

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	遊星歯車式管径追従車輪走行機構よる小口径管内移動作業ロボットに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	宮川豊美
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第3952号, 授与年月日:2008年3月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第3952号, Conferred date:2008/3/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

**遊星歯車式管径追従車輪走行機構による
小口径管内移動作業ロボットに関する研究**

宮川 豊美

2008.2

遊星歯車式管径追従車輪走行機構による 小口径管内移動作業ロボットに関する研究

目 次

本論文で使用した主な記号	iv
第1章 緒 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 従来の研究	5
1.3 本研究の目的	8
1.4 本論文の構成	9
第2章 遊星歯車式管径追従車輪走行機構	11
2.1 はじめに	11
2.2 管内走行機構の基本仕様	11
2.3 遊星歯車式管径追従車輪走行機構	14
2.3.1 基本構成	14
2.3.2 移動原理	15
2.3.3 細径化設計	17
2.4 管内走行機構の動作検証	18
2.5 まとめ	22
第3章 直管走行時の力学解析と構成要素の特性	23
3.1 はじめに	23
3.2 直管走行時の力学解析	23
3.3 車輪走行機構を構成要素の特性	29
3.3.1 歯車列のエネルギー伝達効率	29
3.3.2 車輪と管壁の静止摩擦係数	29
3.4 基本走行実験および考察	32
3.4.1 基本走行実験用試作機	32
3.4.2 基本走行実験	34
3.4.3 車輪の管壁への押付け力	37
3.4.4 牽引力	39
3.4.5 細径化の検討	40
3.5 まとめ	41
第4章 曲管走行時の走行特性	42
4.1 はじめに	42
4.2 曲管対応管内移動ロボットの設計	42
4.3 曲管走行時の力学解析	44
4.4 曲管走行実験および考察	48
4.4.1 曲管対応試作機	48

4.4.2 曲管走行実験	48
4.5 まとめ	54
第5章 段差通過時の力学解析	55
5.1 はじめに	55
5.2 車輪を剛体とした場合の解析	55
5.3 車輪の弾性変形を考慮した場合の解析	67
5.4 段差管による走行実験	75
5.5 段差通過を考慮したロボット機構の設計指針	78
5.6 まとめ	79
第6章 車輪走行機構用高出力アクチュエータの小型化	80
6.1 はじめに	80
6.2 小型サーボアクチュエータの提案	80
6.3 小型高出力アクチュエータの設計	80
6.3.1 ブラシレス DC モータ	80
6.3.2 3K 型不思議遊星歯車減速機	84
6.4 アクチュエータの試作と諸特性	86
6.4.1 ブラシレス DC モータの特性	86
6.4.2 3K 型不思議遊星歯車減速機の特性	89
6.4.3 アクチュエータの出力特性	93
6.4.4 減速機の効率	96
6.5 まとめ	97
第7章 小口径管内移動作業ロボットの設計・試作と走行試験	98
7.1 はじめに	98
7.2 実用化のための設計指針	99
7.3 直管，曲管，段差管で構成された管内の総合走行試験	100
7.3.1 設計仕様	100
7.3.2 設計・試作	100
7.3.3 直管，曲管，段差管で構成された管内の走行試験	101
7.4 極細径管用ロボットの走行試験	104
7.4.1 設計仕様	104
7.4.2 設計・試作	104
7.5 1 インチ管における検査・異物回収ロボット	113
7.5.1 設計仕様と全体構成	113
7.5.2 設計・試作	116
(a) 車輪走行機構	116
(b) フレキシブルカップリング	116
7.5.3 検査・異物回収機構	116
(a) マイクロカメラ	116
(b) マイクロハンド	117
(c) 作業部回転機構	117
7.5.4 1 インチ管用検査回収ロボットの走行試験	124

7.6 配管内部放射能汚染測定ロボット	127
7.6.1 設計仕様と全体構成	127
7.6.2 設計・試作	131
7.6.3 配管内部放射能汚染測定ロボットの評価試験	132
(a) 実規模模擬配管での走行試験	132
(b) 基準線源を用いた放射線測定試験	132
7.7 まとめ	142
第8章 結論	143
8.1 本研究で得られた成果	143
8.2 今後の研究課題	145
参考文献	146
付 録	150
付録 A 直管走行時の車輪走行機構の内力とモーメントの解析結果	150
付録 B 駆動モータの制御方法	152
付録 C 車輪の管壁への押付け力計測用ひずみゲージの校正方法	153
付録 D 車輪を剛体とした段差通過時の力学解析に用いた各係数	154
付録 E 車輪を弾性体とした段差通過時の力学解析に用いた各係数	155
論文リスト	156
謝辞	158

本論文で使用した主な記号

a	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の太陽歯車
$(a-b)$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の太陽歯車と遊星歯車の対
a	: 本体の重心と太陽歯車の重心間の x 成分長さ
b	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車
$(b-c)$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と固定内歯車の対
$(b-d)$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と回転内歯車の対
b	: 本体の重心と太陽歯車の重心間の y 成分長さ
c	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の固定内歯車
d	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の回転内歯車
e	: 管内移動ロボットのスリップ比率
f_k	: 車輪と管壁との動摩擦力
i_{ca}	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の固定内歯車と太陽歯車の歯数比
i_{cd}	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の固定内歯車と回転内歯車の歯数比
l	: キャリアの長さ
m_B	: 本体の質量
m_C	: キャリアの質量
m_G	: 太陽歯車の質量
m_W	: 車輪の質量
r_G	: 太陽歯車のピッチ円半径
r_P	: 遊星歯車のピッチ円半径
r_W	: 車輪の半径
u	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の速比
u_G	: 太陽歯車と遊星歯車間の速比
u_P	: ウォームと太陽歯車間の速比
z_G	: 車輪走行機構の太陽歯車の歯数
z_P	: 車輪走行機構の遊星歯車の歯数
z_W	: 車輪走行機構のウォームの条数
z_a	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の太陽歯車の歯数
z_b	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車の歯数
z_c	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の固定内歯車の歯数
z_d	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の回転内歯車の歯数
z_{RT}	: 空圧ワブルモータのロータの歯数
z_{WR}	: 空圧ワブルモータのワブルリングの歯数
B	: 本体と太陽歯車の動作軸の中心

A_{ij}, B_{ij}	: 行列式の係数
C	: キャリアの重心の位置
D	: 管内移動ロボットの移動距離
D_r	: 管内移動ロボットの計測用エンコーダから算出した移動距離
F	: ロボットの牽引力
F_R	: 管内移動ロボットの等価的損失抵抗
$F_{B,x}$: 本体に作用する力の x 成分
$F_{C,x}$: キャリアと太陽歯車の支持点におけるキャリアに作用する力の x 成分
$F_{C,y}$: キャリアと太陽歯車の支持点におけるキャリアに作用する力の y 成分
$F_{G,x}$: キャリアと太陽歯車の支持点における太陽歯車に作用する力の x 成分
$F_{G,y}$: キャリアと太陽歯車の支持点における太陽歯車に作用する力の y 成分
F_T	: 歯車間に作用する接線力
$F_{W,x}$: 車輪の回転中心に作用する力の x 成分
$F_{W,y}$: 車輪の回転中心に作用する力の y 成分
G	: 太陽歯車とキャリアの動作軸の中心
H	: 段差高さ
I	: モータ電流
I_B	: 本体の慣性モーメント
I_C	: キャリアの慣性モーメント
I_G	: 太陽歯車の慣性モーメント
I_W	: 車輪の慣性モーメント
K_B	: 曲管の曲率半径と管内半径から決まる係数
K, K_T	: モータのトルク定数
$K_P, K_{FV}, K_{PV}, K_{RP}$: モータ制御の制御ゲイン
K_{DR}	: モータドライバのゲイン
K_x, K_y, K_Q	: 車輪の弾性部材のばね定数
K_C	: 押付け力計測用ひずみゲージの校正係数
I_C	: キャリアの慣性モーメント
I_G	: 太陽歯車の慣性モーメント
I_W	: 車輪の慣性モーメント
N	: 車輪の管壁への垂直荷重
L	: 負荷
O	: 車輪と段差部が接触する点
P_x	: 車輪と管壁の接触点に作用する力の x 成分
P_y	: 車輪と管壁の接触点に作用する力の y 成分
R_p	: 配管内径
T	: 太陽歯車と遊星歯車のかみあい点

T_1	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の減速機入力トルク
T_2	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の減速機出力トルク
T_{IN}	: ウォームのトルク
T_{OUT}	: 太陽歯車のトルク
V	: 管内移動ロボットの移動速度
W	: キャリアと遊星歯車および車輪の動作軸の中心
Δx	: 車輪の段差と接触する部分の弾性変形量の x 成分
Δy	: 車輪の段差と接触する部分の弾性変形量の y 成分
Δy_P	: 車輪の管壁と接触する部分の弾性変形量の y 成分
α	: 車輪の点 O まわりの回転角
α_g	: 太陽歯車, 遊星歯車の圧力角
α_W	: ウォームの圧力角
γ_W	: ウォームの進み角
ε	: 車輪の弾性部材が占める部分までの距離の y 成分
$\varepsilon_{0,a}$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の太陽歯車と遊星歯車の対のかみあい率因子
$\varepsilon_{0,c}$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と固定内歯車の対のかみあい率因子
$\varepsilon_{0,d}$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と回転内歯車の対のかみあい率因子
$\varepsilon_{1,a}$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の太陽歯車と遊星歯車の対の近寄りかみあい因子
$\varepsilon_{1,c}$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と固定内歯車の対の近寄りかみあい率因子
$\varepsilon_{1,d}$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と回転内歯車の対の近寄りかみあい率因子
$\varepsilon_{2,a}$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の太陽歯車と遊星歯車の対の遠退きかみあい率因子
$\varepsilon_{2,c}$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と固定内歯車の対の遠退きかみあい率因子
$\varepsilon_{2,d}$: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と回転内歯車の対の遠退きかみあい率因子
ε_a	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の太陽歯車と遊星歯車の対のかみあい率
ε_c	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と固定内歯車の対のかみあい率
ε_d	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と回転内歯車の対のかみあい率
ζ	: 車輪の弾性部材の減衰比
η_G	: 車輪走行機構のウォームと太陽歯車対のエネルギー伝達効率
η_P	: 車輪走行機構の太陽歯車と遊星歯車対のエネルギー伝達効率

η	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の理論効率
η_a	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の太陽歯車と遊星歯車の対の基準効率
η_c	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と固定内歯車の対の基準効率
η_d	: 3K 型不思議遊星歯車減速機の遊星歯車と回転内歯車の対の基準効率
λ	: キャリアの回転角
μ	: 歯車の歯面摩擦係数
μ_S	: 車輪と管壁の静止摩擦係数
μ_K	: 車輪と管壁の動摩擦係数
ρ_B	: 管径中心軸での曲率半径
τ_B	: 本体に作用するモーメント
τ_G	: 太陽歯車のトルク
τ_M	: モータのトルク
$\tau_{M,0}$: 無負荷時のモータトルク
τ_W	: 車輪のトルク
ω_M	: モータの角速度
ω_W	: 車輪の角速度
ω_{RT}	: 空圧ワブルモータのロータの角速度
ω_{WR}	: 空圧ワブルモータのワブルリングの角速度

第1章 緒 論

1.1 研究の背景

現在および将来の社会において原子力発電所は人類の生活を支える重要な施設である。快適な社会生活を維持するためには、この施設の安全性を確保し、致命的な事故を未然に防ぐために、原子力発電所内のパイプラインの損傷の早期発見および保守修理を行うことが極めて重要である。原子力発電所の配管損傷による事故としては、(i) 1999年7月、日本原子力発電敦賀発電所2号機で、再生熱交換器の連結配管が熱疲労により割れ、1次冷却材が漏えい、(ii) 2001年11月、中部電力浜岡発電所1号機で、余熱除去蒸気凝縮系配管内で生じた水素燃料に伴う急激な圧力上昇で配管が破断、(iii) 2004年8月、関西電力美浜発電所3号機で、2次系配管が破損し、付近にいた作業員が流出した蒸気および高温水で被災、などの事故が発生⁽¹⁾しており、原子力施設内の配管の保守・検査の重要性が増している。日本原子力発電敦賀発電所2号機の配管事故は3インチ管で起きたものであり、小口径配管についてもメンテナンスが必要不可欠となってきている。配管は地上に限らず、高所、狭隘箇所、地中、水中と広範囲な場所に設置され、配管は被覆材に覆われていることが多く、この作業を人間が手作業で行うにはあまりにも困難かつ危険である。このため、人間に代わり、配管の検査・保守管理を行う、自律移動可能な配管検査・作業ロボットの開発が強く望まれている。

需要がますます高まる一方で、我が国の原子力発電施設の歴史は半世紀を超えており、老朽化した原子炉の廃止措置（廃炉）の問題がクローズアップされている。この解体作業は、解体に伴うさまざまな技術開発を行いながら進められ、ロボットなどを使った炉内構造物の切断技術や放射性廃棄物の処理方法などが開発されている⁽²⁾。原子炉施設にはコンクリート構造体に埋設された配管が多数存在しており、廃炉の解体計画の立案において、これらの内蔵放射エネルギーを把握することは非常に重要であり、放射能汚染量を非破壊で測定できる検出器を搭載してコンクリート表面や管内を移動できるロボット⁽³⁾⁻⁽⁵⁾が必要となっている。

検査・保守が必要な重要配管網は原子力発電所などの特別施設のみではない。都市においてはガスや水道などのライフラインは住民の日常生活に不可欠であり、ガス管や上下水道管が都市の地下に縦横無尽に張り巡らされている。これらの地中埋設管や高層ビルの壁内埋設管も人類の生活を支える重要な施設であり、その保守管理は極めて重要である。例えば、東京都の中心部における上水道管路網は複雑多岐にわたり、その老朽化に伴う多量の漏水が問題となっており、漏水箇所の同定が重要課題となっている⁽⁶⁾。また、下水道管路網についても明治期以降に埋設された管路が補修・更新の時期を迎えており、特に小口径管の埋設管の内部からの補修箇所の判定や補修の実施の要求が強い⁽⁷⁾。ガス管に関しても、先の阪神大震災で寸断された被災地のガス管路の復旧は漏出箇所の同定に手間取ったため、多大な時間を要したことが知られており、効率的な検査の必要性が指摘された⁽⁸⁾。これらの都市の配管においても、埋設配管や小口径配管の内部など、やはり人間が直接検査できない狭隘箇所については、分解点検や工業内視鏡などを管内に挿入して検査を行わねばならない。このとき、直管、曲管、分岐管、段差管などの組み合わせである複雑な形状の管や挿入距離が長い管では操作に技術が必要となり、検査に費やす時間がかかるなどの問題があり、点検作業の自動化、効率化のために管の内部を自走しながら検査可能なロボットの実現が強く望まれている。

このような背景の下に、配管内を自走しながら検査・作業するロボットの研究⁽⁹⁾は数多く行われている。管内で検査作業する自走ロボットに許される空間は狭く、その限られた空間

の中で多様な形状の管内を自走し、さらに各種の検査作業を行わなければならない、必然的にコンパクトな機構を設計することが要求される。管内自走ロボットに採用されている主な走行方式は、図 1.1 に示すように、車輪型、クローラ型、インチワーム型、振動型の 4 種類に大別され、それぞれ特徴を有する。車輪型は他の方式と比べて高速な走行ができ、構造がシンプルであるが、管内の凹凸部の追従性は他に比べて劣っている。クローラ型は不整地を走行するのに適したクローラを用いているため、管内に凹凸部がある場合にも容易に走行でき、大きな牽引力が得られる。しかし、車輪型に比べて構造が複雑で小型化が困難である。尺取り虫に似た仕組みで動作するインチワーム型は凹凸部の走行性能に優れ、小型化も容易であるが、走行速度が低いのが欠点である。振動型は複雑な機構を用いずに振動と摩擦伝動によってロボット本体と管壁間で滑動させる。インチワーム型と同様に凹凸部の走行性能に優れ、小型化も容易であるが、走行速度が低い。車輪型とクローラ型の動力源には電磁モータが使用されているのに対し、インチワーム型の動力源は空気圧が多く用いられている。また、振動型は圧電素子、超磁わい素子などの機能材料アクチュエータが用いられている。自走する管内ロボットには自らの質量の搬送のみならず管内の検査を行う検出器を牽引しなければならないとされる。そのために移動機構の車輪などを管壁にグリップさせる押付け機構が必要とされる。インチワーム型、振動型は管軸方向に伸縮して移動するために本質的にその機能を移動機構が有している。これに対して、車輪型とクローラ型にはこの押付け機構が必須の構成要素となり、ばねを利用した方式が多く用いられている。

以上のように、管内を自走するロボットの開発のポイントは機構の小型化であり、内径 100mm (4 インチ管) 以上の中大口径管のロボットの開発は車輪型^{(10)~(20)}とクローラ型^{(21),(22)}が多く、実用化されているものもある。しかしながら、内径 100mm 以下の小口径配管 (1 ~ 3 インチ管) を対象としたロボットの開発は遅れているのが現状で、実用化された例はほとんどない。しかしながら、内径 50mm (2 インチ管) の配管はガス管に多く使用されていることから、多くの研究開発が進められている。複数の車輪をもつ駆動車をフレキシブルカップリングで多重連結し、曲管部の走行能力を高めたもの^{(10),(11)}、無段変速機能を有する Whole Stem Drive 機構によるもの^{(15)~(17)}、複数の駆動車輪で L 字管通過が可能なもの⁽²⁵⁾、ゴム製ガスアクチュエータを利用したインチワーム型の管内走行ロボット⁽²⁶⁾など多くの開発例がある。これに対して、1 インチ管以下では、インチワーム型^{(27),(28)}、振動型^{(29)~(33)}などがあり、車輪型^{(34)~(37)}の報告が少ないのが現状である。これは駆動源を含めた移動機構およびそれを管壁に押付ける押付け機構の小型化に限界があることが要因の一つに挙げられる。

一方、車輪型として鈴森ら^{(38),(39)}により提案された遊星歯車機構を利用して車輪を駆動させる車輪走行機構がある。これは 2 インチ管の管内走行ロボットの走行機構として提案されたもので、車輪を管壁に押付けつつ走行でき、異なる管径に対しても対応できることが特長である。図 1.2 に開発された 2 インチ管用管内移動ロボットの断面図を、図 1.3 にそのロボットの外観写真を示す。モータの回転動力は、ウォーム、太陽歯車、遊星歯車に伝えられ、遊星歯車と軸を共有する車輪を駆動する。遊星歯車と車輪は太陽歯車の中心軸まわりを自由に回転できるキャリアに支えられている。このロボットに進行方向と逆方向の負荷が作用すると車輪を管壁に押付けるくさび効果が作用する。このため、軸方向の負荷の大きさに応じて車輪の押付け力が付与される機能をもっている。また、このロボットには FMA (Flexible Micro Actuator) と呼ばれる繊維強化ゴムからなる空圧アクチュエータ⁽⁴⁰⁾を組み合わせて、エルボ管、T 字管、垂直部を通過できることが確認されている。また、小型 CCD カメラを搭載して目視点検が可能であることも確認している⁽³⁸⁾。以下ではこの車輪走行機構を「遊

星歯車式管径追従車輪走行機構」と呼ぶことにする。

車輪走行機構と押付け機構を単純に組み合わせた場合には構造が複雑になり管内移動ロボットの小型化が困難となる。その点、遊星歯車式管径追従車輪走行機構は車輪を管壁に押し付けつつ走行でき、押付け力はロボットの進行方向と逆方向の負荷の大きさに応じた押付け力が付与される。また、主要な構成要素が歯車機構と駆動用モータであることから、小径の歯車と小型モータを使用することで小型化が可能となることから、1インチおよびそれ以下の管内移動ロボットの走行機構に有望な機構である。さらに、基本構造は同じで歯車機構と駆動用モータの大きさをかえることで3インチ管にも適用できる。

小口径（1～3インチ管）の管内移動ロボットの実用化には、さまざまな形状（垂直管、曲管、段差管、分岐管）の管内を安定して走行でき、かつ高い信頼性を有する管内走行機構の開発が重要な課題である。しかしながら、遊星歯車式管径追従車輪走行機構を利用した管内移動作業ロボットは試作機による実験のみの検討で、理論的検討は少なく、特に走行時の力学特性が明らかになっていないのが現状である。ゆえに、配管形状に応じたロボットの設計を行うには、走行時の現象や駆動トルクの解明などロボットの運動特性ならびに力学特性の理論的および実験的検討が必要で、さまざまな形状の管内を走行できるロボットの具体的な設計指針の確立が望まれる。

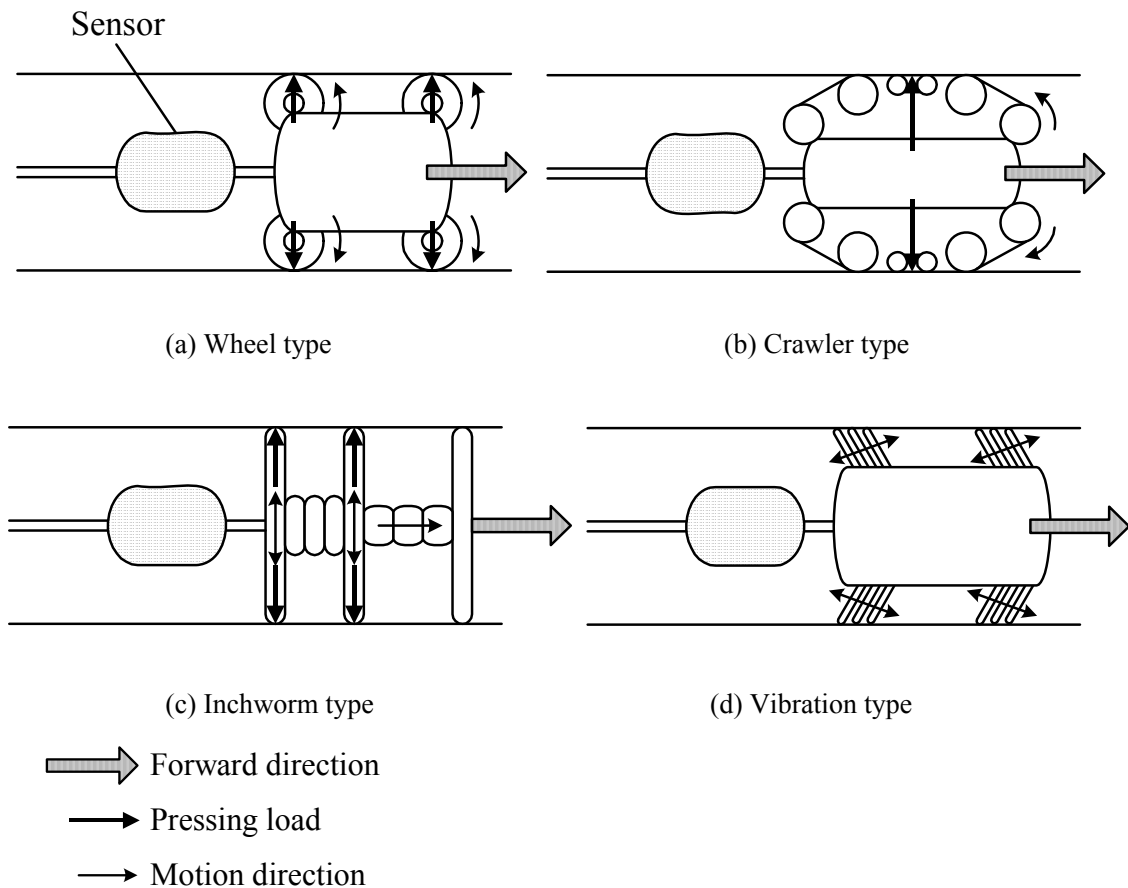


Fig. 1.1 Classification of in-pipe robots

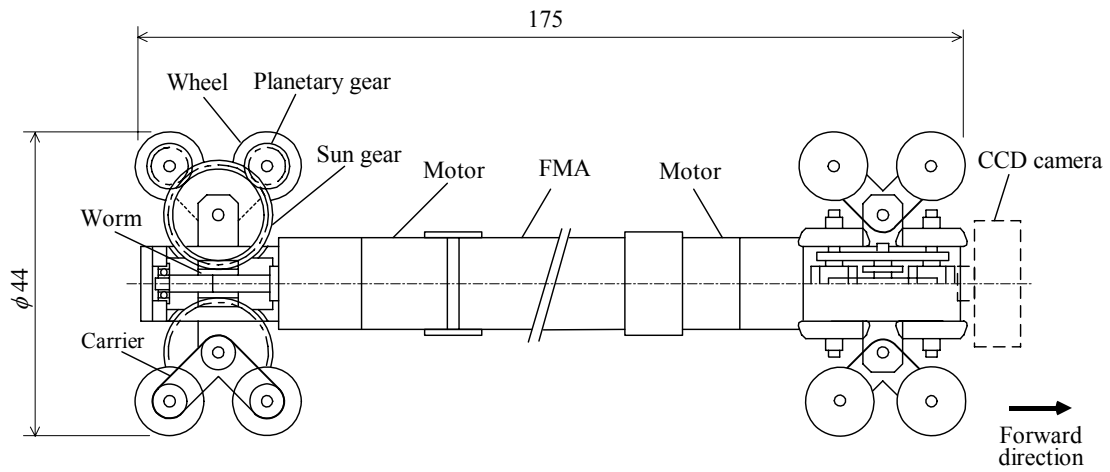


Fig. 1.2 Cross-sectional view of the in-pipe mobile robot for 2-inch pipes

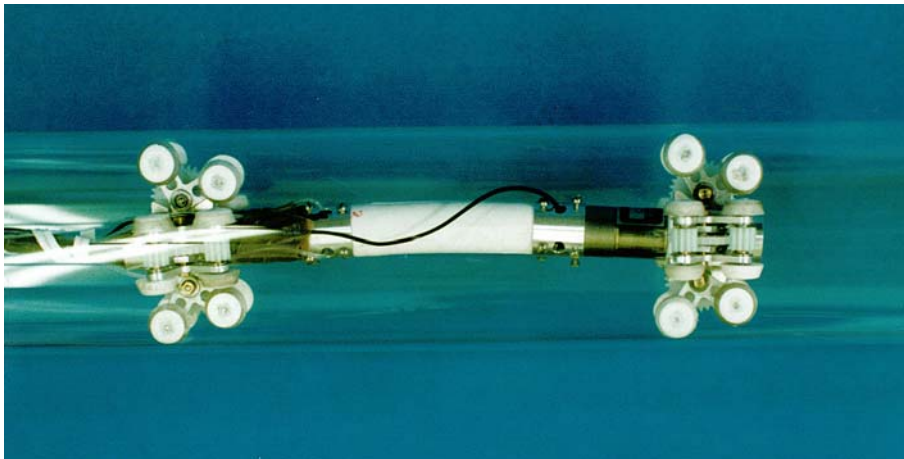


Fig. 1.3 Photograph of the in-pipe mobile robot for 2-inch pipes

1.2 従来の研究

管内移動ロボットに関する従来の研究および技術状況について、適用する配管径の大きさを4インチ管、2～3インチ管、1インチ管に分け、それぞれの形式に分類して概観する。

(1) 4インチ管用の管内移動ロボット

内径100mm(4インチ管)の管内移動ロボットは、移動速度と自走できる距離を考慮して各種方式のものが開発されている。このサイズでは車輪型は車輪駆動機構と押付け機構を独立に配備できるために、さまざまなロボットが開発されている。藤原ら⁽¹³⁾は1対の移動車輪と1対の操舵輪を用いて走行機構で曲管やY分岐管の走行を可能にしている。このロボットは、エアシリンダによる車輪の管壁への押付け機構を有しており、幅広い管径の変化に対応でき、既に実用化されている。広瀬ら^{(17),(24)}は図1.4に示すような管軸に垂直な平面に4つの駆動輪を放射状に配置し、駆動輪を回転させて管内を推進させている。さらに、駆動輪と管壁とのなす角度を常時計測する計測用車輪が各動輪に取り付けられ、フィードバック制御で姿勢を保持する手法を用いてエルボ部の通過を実現させている。Choiら^{(19),(20)}は図1.5に示すような管軸に垂直な平面に3つのドライビングモジュールを放射状に配置した管内移動ロボットを試作している。ロボットの走行はそのドライビングモジュールをそれぞれ独立して動作、制御させることで直管、L字管、T字管を走行可能とし、車輪の方向を操向させるステアリング機構は有していない。村松ら⁽¹⁸⁾は複数の車輪駆動ユニットを連結させた構成で、各ユニットには4個の車輪を管軸に対して放射状に配置したものを試作している。各ユニットの車輪の移動量を制御することでエルボやT字管の走行を可能にしている。これらの走行機構の車輪の押付け機構はばねとリンク機構で実現させている。大久保ら⁽²¹⁾は複数車輪が管軸に対して一定の傾斜をもって取り付けられ、各車輪が螺旋状の軌跡を描きながら自走するものを開発している。また、川口らは二重磁石車輪により管の継ぎ手などの段差部分を乗り越え可能な車輪型鉄管内走行ロボット⁽⁴²⁾を開発している。田口らは分岐方向を接触センサで検知し自動的に通過できるユニット型小口径配管内走行ロボット⁽¹⁴⁾を開発している。これは2自由度の操舵ユニットを進行方向へ向けることで分岐管の通過を実現させている。以上の4インチ管対応の車輪型管内移動ロボットは実用的な走行性能を有しているものの、いずれも独立した車輪走行機構と押付け機構を有しており構造は複雑で小型化への適用は難しい。

クローラ型^{(21),(22)}は管壁の凹凸面の走行が容易であることから、管径が変化するような環境で使用することを目的に開発されている。駆動方式は車輪方式と同じで、管軸に垂直な平面に複数の駆動用クローラを放射状に配置し、それらを回転させて管内を推進させている。クローラの押付け機構はばねとリンク機構で実現させている。また、クローラ型は大きな牽引力が得られることから4インチ管以上の管内検査ロボット⁽²¹⁾に多く使用されている。クローラ型は構造が車輪型よりさらに複雑で小型化は困難である。

インチワーム型は移動速度が低速であるが確実な移動が可能であることから、長い移動距離が必要な用途で使用されている場合が多い。小沢ら⁽¹²⁾は、最大自走距離150mに適用するインチワーム型の管内検査ロボットを開発している。その駆動方式はエアシリンダで前後のクランプ台車とその間に配置されたストローク台車を動作させ自走する。しかしながら、インチワーム型は一定速度での走行が難しく検査の自動化には適していないと考えられる。

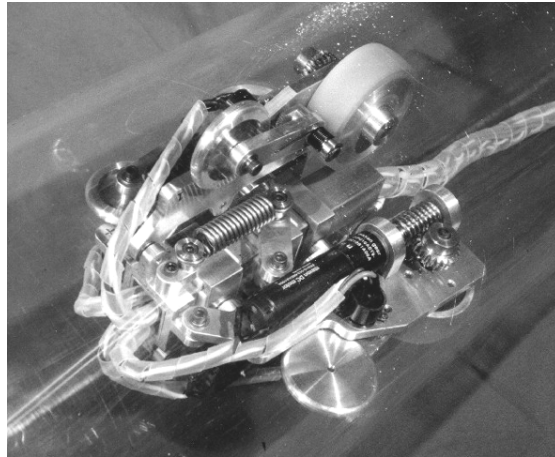


Fig. 1.4 An in-pipe mobile robot for 150mm pipes by Hirose⁽¹⁷⁾

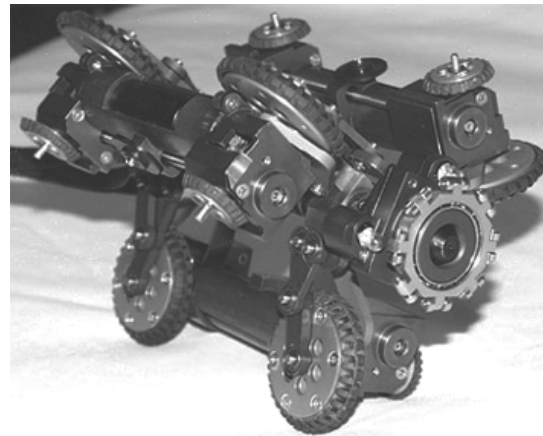


Fig. 1.5 An in-pipe mobile robot for 4-inch pipes by Choi⁽²⁰⁾

(2) 2～3インチ管用の管内移動ロボット

この管径に対しては構造が複雑なクローラ式の開発例は少なく、車輪型あるいはインチワーム型が多い。車輪型として、複数の車輪をもつ駆動車をフレキシブルカップリングで多重連結し、曲管部の走行能力を高めた内径 50mm の管内を移動する重連車輪型ロボット⁽¹⁰⁾が開発されている。広瀬らは無段変速機能を有する Whole Stem Drive 機構による内径 50mm の管内を移動する管内移動ロボット^{(17),(23)}を開発している。福田らは内径 50mm の管内を移動する2種のロボットを開発している。1つが複数の駆動車輪を用いた機構で L 字管通過が可能で渦電流センサによる管壁の検査が可能な管内走行検査ロボット⁽²⁵⁾である。もう1つがゴム製ガスアクチュエータを利用したインチワーム型の柔軟構造型管内走行検査ロボット⁽²⁶⁾である。山口らは「ねじ原理」を利用して内径 100mm と内径 75mm の管の継手部における段差を特別なアクチュエータを用いることなく自動的に通過できる「ねじ原理」移動作業ロボット⁽⁴³⁾を開発し、段差乗り越えに必要な車輪の大きさおよび乗り越えに必要な駆動トルクの関係式を導いている。大野らは空気圧で駆動するベローズと複数の摩擦リングを

組合せ、ベローズの伸縮で管内を移動するロボット⁽⁴⁴⁾を開発している。このロボットは内径 44mm の管内を 20m 移動できる。また、同じ構造で内径 140mm から内径 70mm の管へ移動できる管内移動ロボット⁽⁴⁵⁾を開発している。そして、鈴木らの遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた 2 インチ用管内走行ロボット^{(38),(39)}がある。FMA⁽⁴⁰⁾と組み合わせることで、エルボ管、T 字管、垂直部が通過できる。以上の研究は試作機を用いた走行特性の確認は行っているが、ロボットの設計指針についての検討はほとんどされていないのが現状である。

(3) 1 インチ管用の管内移動ロボット

1 インチ管およびそれ以下の管内移動ロボットとしては、インチワーム型、振動型などが代表的であり、車輪型の報告が少ない。Anthierens らは空気圧アクチュエータのインチワーム動作で管内を走行し、内径 17mm の管内を移動でき、搭載した磁気センサで管壁の検査も可能な管内検査ロボット⁽²⁷⁾を開発している。則次らは空気圧で駆動する 2 種類の空気圧ソフトアクチュエータを用いて本体が柔軟な内径 24mm の管内を移動できる管内移動ロボット⁽²⁸⁾を開発している。青島らは圧電バイモルフと弾性板を用いて構成した内径 20mm の管内を移動する細径管移動機械⁽³⁰⁾を開発している。井戸垣らは慣性体、伸縮アクチュエータ、クランプより構成され、アクチュエータの急速変形で慣性力を発生させて管内を移動する慣性駆動式管内移動マシン⁽³³⁾を開発している。高橋らはみみずの運動を応用した細径内移動ロボット⁽⁴⁶⁾を開発している。このロボットは前述の FMA をアクチュエータとして 3 本用いて内径 20mm の管内の移動を実現した。車輪型としては、林らは図 1.6 に示すような「ねじ原理」を利用して内径 25mm の直管および曲率半径 150mm の曲管内を走行できる細管内移動作業ロボット^{(34),(35)}を開発している。このロボットでは車輪を従動輪としてロボット本体に管軸に対して斜めに取り付けて管内壁に押し付けておき、本体をフレキシブルワイヤと呼ばれる曲げ剛性は低いがねじり剛性が高いワイヤを介して回転させることにより、車輪と管内壁の間に摩擦分力を発生させて本体の管内推進力を得るものである。広瀬らは内径 25mm のガス配管内を移動するワイヤ駆動型移動機構⁽³⁶⁾を開発して曲管走行や段差乗り越えが可能であることを示している。鈴木らはフレキシブルウォームホイール⁽³⁷⁾という機構を提案し、それを用いた内径 21mm の管内を移動できる管内移動ロボットを開発している。



Fig. 1.6 An in-pipe mobile robot for 1-inch pipes by Hayashi⁽³⁵⁾

これらの研究も同様で試作機を用いた走行特性の確認は行っているが、ロボットの力学特性の理論的検討はあまり行われておらず、設計指針についての検討はほとんどされていない。

以上、管内移動ロボットの従来の研究について、適用する配管径の大きさに分けてまとめだが、1～3インチ管の管内移動ロボットに対して走行機構の構造が同じで共通の設計ができる機構の報告はほとんどなく、動力源であるアクチュエータがロボットに搭載されて移動するものも少ない。また、曲管、段差管、分岐管などの配管形状に応じたロボットの設計指針を検討した報告も少ないのが現状である。

これに対して、遊星歯車式管径追従車輪走行機構は車輪を管壁に押付ける機構を独立に設ける必要がなく、動力源のモータは1台で済む。この車輪走行機構とフレキシブルカップリングを組み合わせることで、垂直管、曲管、段差管などのさまざまな管内を1つのモータを制御すること走行が可能である。また、歯車機構とモータを小型化にすることで1インチおよびそれ以下の管内を走行できるロボットの実現が期待できる。さらに、ロボットの基本構造は同じで歯車機構と駆動用モータの大きさを変えることで3インチ管にも適用できるので、設計を共有化できるというメリットもある。以上のような長所を有している遊星歯車式管径追従車輪走行機構は管内移動作業ロボットの移動機構として有望であると考えられる。

1.3 本研究の目的

前節までに述べたように、遊星歯車式管径追従車輪走行機構は、車輪を管壁にグリップさせる押付け機構を独立に設置する必要がないこと、垂直管、曲管、段差管などの管内を特別な制御することなく走行が可能であること、小口径管内（1～3インチ管）の車輪走行機構の共通化設計が可能であることから、管内移動作業ロボットの移動機構として有望である。そこで本研究では、この車輪走行機構からなる小口径管内移動ロボットの直管内、曲管内、段差管内の走行時の運動特性ならびに力学特性について理論的ならびに実験的な検討を行い、設計・試作した検査などの作業機能を具備したいくつかの小口径管内移動作業ロボットによる検証実験を行って、曲管や段差管などから構成される配管内を走行しさらに検査・補修作業が可能な管内移動作業ロボットの具体的な設計指針を得ることを目的とする。

具体的には、以下の手順で研究を進めた。

- (1) 対象とする小口径管内移動ロボットの基本仕様を明らかにし、遊星歯車式管径追従車輪走行機構の1，2，3インチ管への適用性について検討する。
- (2) ロボットの直管走行時の力学特性について理論的および実験的に検討する。
- (3) ロボットの曲管走行時の力学特性について理論的および実験的に検討する。
- (4) ロボットの段差通過時の力学特性について理論的および実験的に検討する。
- (5) ロボットの動力源として小型で高トルクのサーボアクチュエータの構成について提案し、トルク／体積比の高いアクチュエータであることを示す。
- (6) 小口径管内移動作業ロボットを設計・試作し、走行および作業試験を行い、それぞれのロボットの走行特性が仕様を満足するか検証する。

1.4 本論文の構成

1, 2, 3 インチ管内を走行可能な遊星歯車式管径追従車輪走行機構からなる管内移動ロボットの具体的な設計指針の確立を目的として, 1.3 節に述べた手順で研究をすすめ, 得られた結果を章ごとにまとめた. 以下に本論文の構成を記す.

第1章「緒論」では, 本研究の背景と小口径管内移動ロボットに関する従来の研究, そして本研究の目的が各種形状の管内に適用できる小口径管内移動ロボットの具体的な設計指針の確立にあることを述べ, 最後に本論文の構成について述べる.

第2章「遊星歯車式管径追従車輪走行機構」では, まず, 管内移動ロボットの特性要因を総合的に評価し, 本研究で対象とする小口径管内移動ロボットの基本仕様を明らかにする. そして, 遊星歯車機構のキャリアに取り付けられた車輪を管壁に押付けつつ走行でき, 異なる管径に対しても対応できる遊星歯車式管径追従車輪走行機構の基本構成および駆動原理について示し, 1, 2, 3 インチ管に適用する遊星歯車式管径追従車輪走行機構をそれぞれ試作し, 走行実験を行い, 共通の設計で1, 2, 3 インチ管に適用できる機構であることを示す. さらに, 本機構は1 インチ以下の細径管内走行機構にも適用可能なことを示す.

第3章「直管走行時の力学解析と構成要素の特性」では, 直管における基本走行特性を明らかにするために, まず, 直管走行時の力学解析を行い, 管軸方向の負荷および車輪と遊星歯車のキャリアの角度と車輪の管壁への押付け力の関係を検討した. そして, 車輪走行機構の構成要素である歯車列のエネルギー伝達効率と車輪と管壁との静止摩擦係数を実験で明らかにし, 試作した外径 45mm, 長さ 130mm の管内移動ロボットの走行特性を実験で検証する.

第4章「曲管走行時の走行特性」では, 曲管内に適用できるように管内移動ロボットの改良を行い, 曲管走行時の力学特性を明らかにするための力学解析を行い, 曲管部の曲率半径の大きさと駆動トルクの関係式を示す. そして, 第3章の試作機を改良して曲管通過の走行実験を行い, 導出した関係式の妥当性を示す.

第5章「段差通過時の力学解析」では, ロボットの管径変化への適応性能を明らかにするために, まず, 車輪走行機構が段差を通過する過程の力学解析を行い, 車輪走行機構を構成する太陽歯車と遊星歯車のかみあい点の位置が車輪と段差が接触する位置より前方となる幾何学的条件を満たすことで段差乗り越えが可能になることを明らかにする. そして, 解析結果を第3章の試作機に適用するには車輪の弾性変形を考慮する必要がある, 車輪の弾性変形を考慮した解析を行い, 駆動モータの制御系を含めた段差通過時の現象を明らかにし, 段差を乗り越えられる管内移動ロボットの設計指針を示す.

第6章「車輪走行機構用高出力アクチュエータの小型化」では, まず, 小口径管内移動作業ロボットの動力源として小型で高トルクのサーボアクチュエータの構成について検討し, 小型ブラシレス DC モータと 3K 型不思議遊星歯車減速機を組み合わせた構成が最もコンパクトなサーボアクチュエータで小型軽量化に適することを示す. そして, 高トルク化が達成できる小型ブラシレス DC モータのロータ極数とコイル数を検討し, 小型の 3K 型不思議遊星歯車減速機の設計にかみあい率均等化による効率改善手法を適用することで効率は従来設計と比べ 10%程度向上すること, そしてこれらの設計法で得られた試作機のトルクは同じトルクを発生できる従来品と比べ, トルク/体積比は高く体積は約 30%減であることを示す.

第7章「小口径管内移動作業ロボットの設計・試作と走行試験」では, まず直管, 曲管,

段差管で構成された管内の総合走行試験を行い、走行特性を確認する。次に、1インチ以下の極細径管内を移動できるロボットを試作し、極細径管内にも適用できることを実証する。そして、2種類の小口径管内移動作業ロボットを設計・試作し、1インチ管における検査・回収ロボットおよび配管内部放射能汚染測定ロボットの走行特性、作業機能が実用的な性能を有していることを検証する。

第8章「結論」では、本研究で得られた成果および今後の課題について述べる。

第2章 遊星歯車式管径追従車輪走行機構

2.1 はじめに

小口径管内を移動して作業を行う管内移動作業ロボットにおいて、走行機構は最も重要な要素であり、これまでも各種の走行機構が開発されている。2インチ管以上では曲管走行に有利^{(10),(11)}とされる車輪走行方式が多く採用されている。これに対して1インチ管以下では、インチワーム方式^{(27),(28)}、みみずのぜん動運動を利用した方式⁽⁴⁶⁾、圧電振動方式⁽²⁹⁾⁻⁽³³⁾などがあり、車輪方式の報告が少ないのが現状である。これは駆動源を含めた走行機構の小型化に限界があることが要因の一つに挙げられる。一方、鈴木^{(38),(39)}により提案された遊星歯車機構を利用して車輪を駆動させる車輪走行機構がある。これは2インチ用管内走行ロボットの走行機構として提案されたもので、車輪を管壁に押付けつつ走行でき、異なる管径に対しても対応できることが特長である。また、主要な構成要素が歯車機構とモータであることから、小径の歯車とモータを使用することで細径化が可能となることから、小口径管内移動ロボットの走行機構に適する機構であると考えられる。

本研究では、この機構を管内移動ロボットの走行機構として採用し、その性能を明らかにして設計指針を明確にする。本章では、管内移動ロボットの走行機構の基本仕様を設定して、遊星歯車式管径追従車輪走行機構がその仕様に適することを示す。

まず2.2節では、管内走行機構の設計に必要な基本仕様を管内移動ロボットの特性要因から総合的に評価し基本仕様を明らかにする。次に2.3節では、遊星歯車式管径追従車輪走行機構の基本構成および駆動原理について説明し、1インチ以下の管内走行機構に適した車輪走行機構を提案する。そして2.4節では、1、2、3インチ管に適用する遊星歯車式管径追従車輪走行機構をそれぞれ試作し、予備的な走行実験を行い本車輪走行機構の有用性を実験的に確認する。

2.2 管内走行機構の基本仕様

配管内を走行する管内移動ロボットにはその作業目標や環境によって要求される基本仕様が異なる。例えば、管内の溶接部分をカメラまたは超音波センサで検査する場合、検査する領域では一定速度で走行して詳細な検査を行い、それ以外の領域では高速で走行することで作業効率は良くなり、走行機構には走行速度を制御できる機能が必要となる。また、溶接配管では溶接部分の管壁は凸部になっており、段差を乗り越えられる走行特性を有することも必要となる。

このように作業や環境によって管内移動ロボットの基本仕様は大きく異なるので、図2.1に示す特性要因図を用いて各種の管内走行方式を総合的に比較評価して、管内走行機構の基本仕様および設計方針を明らかにする。

本研究で扱う管内走行ロボットの基本仕様としての作業目的と適用環境は以下のように設定する。

- (1) 配管は口径1、2、3インチとし、水平管、垂直管、曲管の走行が可能とする。曲管は管中心曲率半径が口径の約5倍以上の90°エルボ管とする。
- (2) 使用環境は、大気中で温度-10℃～40℃、湿度80%以下とする。
- (3) 配管の継手は溶接継手として、継手部の凸部を乗り越えられること。

- (4) 管径が変化する管内（管内径の1割程度の変化）の走行が可能である。
- (5) 目視検査が可能な小型カメラを搭載して、垂直管、曲管の走行が可能である。
- (6) 走行時の走行速度の制御が容易で、自動走行が可能である。

自走式の管内移動ロボットに用いられている走行方式は、図 1.1 に示すように、車輪型、クローラ型、インチワーム型、振動型などに分類できる。これらの管内走行方式はそれぞれ長短があり、図 2.1 に示す走行特性、操作性、機構の信頼性、適用環境などの特性要因に前述の基本仕様を加味してそれぞれの特徴を評価した結果を表 2.1 に示す。この結果および以下の点に優れることから本研究では車輪型走行機構を採用する。

- (a) 構造が最もシンプルである。
- (b) 全姿勢の走行が可能で、走行時の速度や位置決めが容易である。
- (c) 複数の駆動車輪を設けることにより牽引力の増加が可能である。

そして、小口径管内移動ロボットの走行機構の設計方針を以下のようにした。

- (i) 車輪は管壁との摩擦力を得て推進するために車輪を管壁に押付ける機構を有する。
- (ii) 駆動源は制御性に優れ、力/自重比が大きく、小型サーボ機構への構築が容易なアクチュエータで構成する。
- (iii) 曲管走行がスムーズに行えるように小型軽量であること。特に全長が短いこと。
- (iv) 1 インチ、2 インチ、3 インチ管用で共通化設計が可能であること。

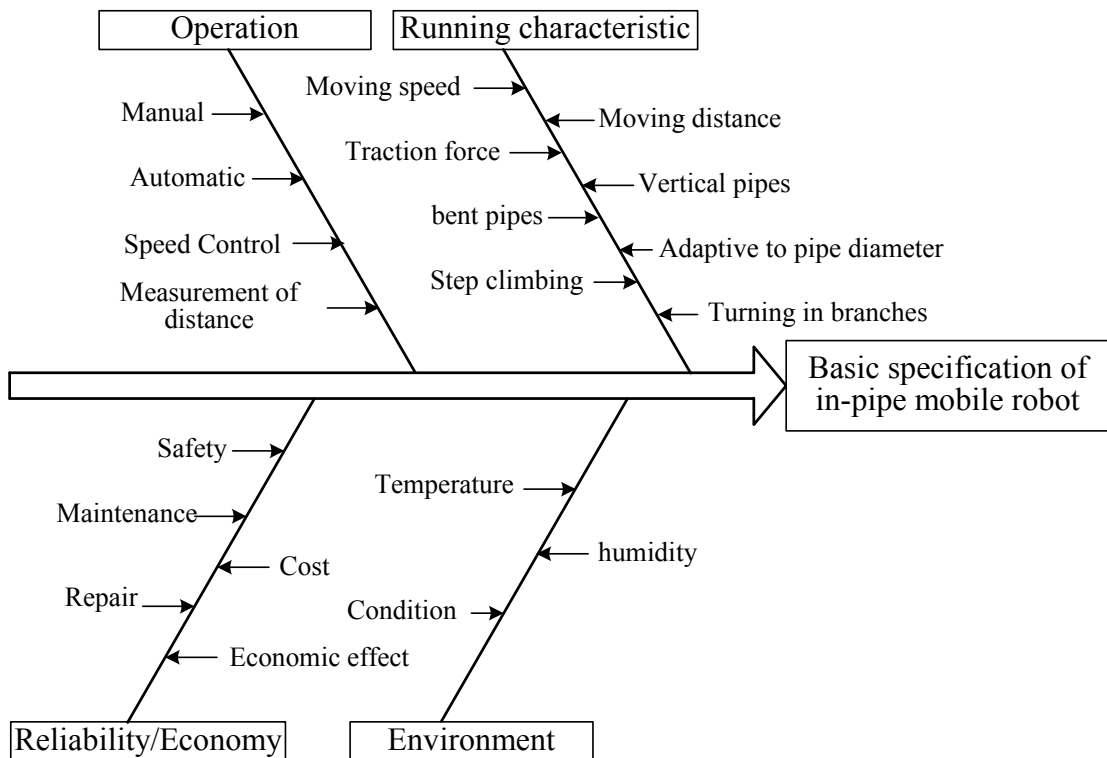


Fig. 2.1 Basic specification of in-pipe mobile robot

Table 2.1 The evaluation of the drive mechanism

Type	Wheel type	Crawler type	Inchworm type	Vibration type
Running characteristic	○	○	○	○
Operation	○	○	△	△
Reliability/ Economy	○	△	○	△
Environment	○	○	○	○
Mechanism size	△	△	○	○

とくに、車輪走行機構では押付け機構が走行性能に深く関与するため、シンプルな構造でコンパクトなものがこれまで望まれていた。押付け機構用のアクチュエータを使用せずに車輪を管壁に押付ける機構を有するものとしては、鈴森らにより提案された車輪走行機構⁽³⁸⁾が挙げられる。この車輪走行機構は、遊星歯車機構を利用して車輪を駆動させるものであり、FMA (Flexible Micro Actuator) と呼ばれる繊維強化ゴムからなる空圧アクチュエータ^{(40),(41)}を組み合わせた2インチ用管内移動ロボットが開発され、基本的な機能を満足することが確認されている。

ここで、FMA は内部が3つの圧力室に分かれた繊維強化ゴム製の流体アクチュエータである。アクチュエータの外壁には周方向に繊維が埋め込まれており異方性弾性を与え、3室の圧力間に差を与えると任意の方向へ湾曲する。湾曲方向、曲率、伸張量は圧力室の圧力の組み合わせによって決まり、計3自由度の動作が行えるため、FMA は分岐管やT字管の通過を行うためのステアリング用に使用されている。詳細の構造と動作原理については第7章で示す。

この提案された車輪走行機構は、車輪を管壁に押付けつつ走行でき、異なる管径に対しても対応できることが特長である。また、主要な構成要素が歯車機構とモータであることから、小径の歯車とモータを使用することで細径化が可能となることから、小口径管内移動ロボットの管内走行機構に適する機構であると考えられる。そこで、この遊星歯車式管径追従車輪走行を管内移動ロボットの走行機構として用いることにする。

2.3 遊星歯車式管径追従車輪走行機構

2.3.1 基本構成

小口径管内移動ロボットの管内走行機構のベースである遊星歯車式管径追従車輪走行機構の基本構成および駆動原理を図 2.2, 図 2.3 に示す. 図 2.3 は図 2.2(a)に示した構成の側面図である. この車輪走行機構は, 小型モータの回転動力を遊星歯車機構と車輪を介して管内壁に対する摩擦駆動力に変換して, 管内走行を実現する. 遊星歯車機構はウォーム, 太陽歯車, 遊星歯車からなり, 車輪は遊星歯車と共有する軸に固定されている. 太陽歯車はウォームとかみ合うウォームホイールではすば歯車を駆動できることから, 太陽歯車および遊星歯車ははすば歯車とした. ウォームの回転がまず太陽歯車に伝達され, 太陽歯車で駆動される遊星歯車および車輪は太陽歯車の中心軸まわりを回転できるキャリアに支えられており, 太陽歯車の中心を公転することができる.

図 2.3 に示すように 1 個の太陽歯車に対して 2 個の遊星歯車がかみあい, それぞれの遊星歯車には遊星歯車を挟むように両端に 2 個の車輪が装着されている. この太陽歯車, 遊星歯車, 車輪からなるユニットを 1 組の車輪列とすると, モータ, ウォームおよび複数組の車輪列が円周方向に等配されたものを総称して車輪走行機構と呼ぶことにする. 管内走行するためには車輪列は最低 2 組必要であるが, 通常は 3 組あるいは 4 組の車輪列を組み合わせることとなる.

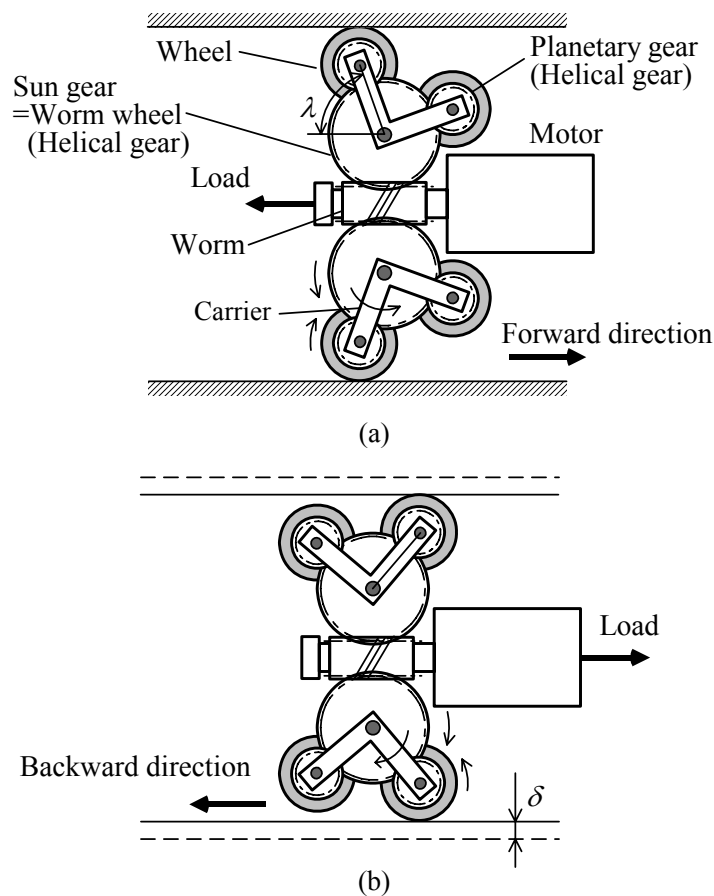


Fig. 2.2 Driving principle of the wheel drive mechanism

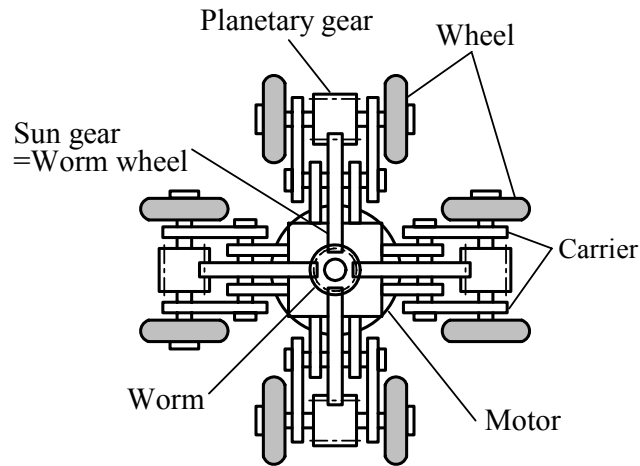


Fig. 2.3 Configuration of the wheel drive mechanism

2.3.2 移動原理

車輪走行機構は車輪が太陽歯車のまわりを公転でき、その公転が止められると車輪が自転する機構になっている。図 2.2(a)の右方向に走行する場合、車輪の1つが管壁に接触するまで遊星歯車が太陽歯車のまわりを公転し、車輪の公転は止められ、車輪が自転して管壁との間で推進力を発生させ走行する。管壁に接触する車輪は進行方向に対して後ろ側の車輪である。図 2.2 (b)の左方向に走行する場合も同様に、進行方向に対して後ろ側の車輪が管壁に接触し、その車輪によって走行する。また、図 2.2 (b)のように管半径が δ だけ小さくなった場合は、キャリア角度 λ が管半径の変化に応じて変わる。したがって、管内径が異なる管径に対してもキャリア角度 λ が変化することで車輪を管壁に常に接触させることが可能となる。負荷が進行方向と逆方向に作用した場合、キャリアが回転しようとするため車輪を管壁に押付ける力が作用する。負荷により管壁に接触している車輪を中心にキャリア角度 λ が大きくなるように働く。このため、管軸方向の負荷の大きさに応じて車輪の管壁への押付け力の大きさが決まる。

この車輪走行機構は図 2.4 に示すような構成で管内を走行させる。図 2.4(a)は1つの車輪走行機構とガイドユニットがカップリングを介して装着させたタイプであり、図 2.4(b)はカップリングの前後に車輪走行機構を装着させたタイプで2つの車輪走行機構で走行する。

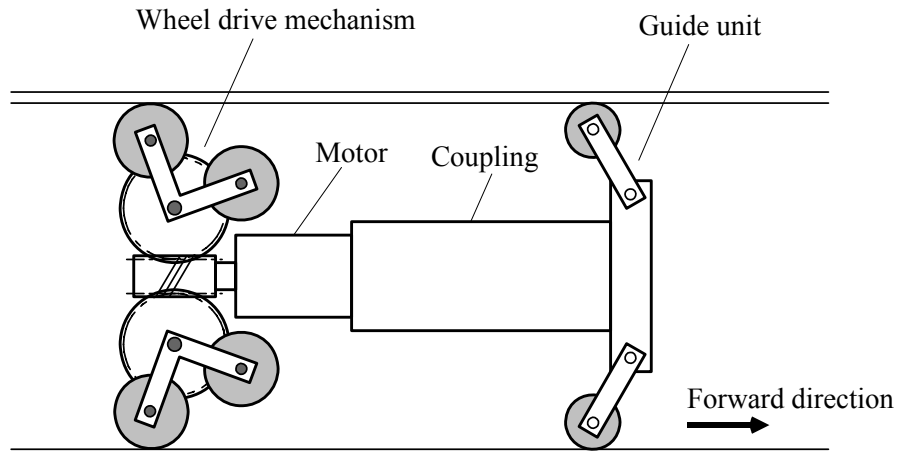
車輪は遊星歯車と共有する軸と同軸に装着されていることから、車輪の角速度 ω_W とモータの角速度 ω_M の間には幾何学的に次の関係が成り立つ。

$$\frac{\omega_W}{\omega_M} = \frac{z_W}{z_G} \frac{z_G}{z_P} = u_G \cdot u_P \quad (2.1)$$

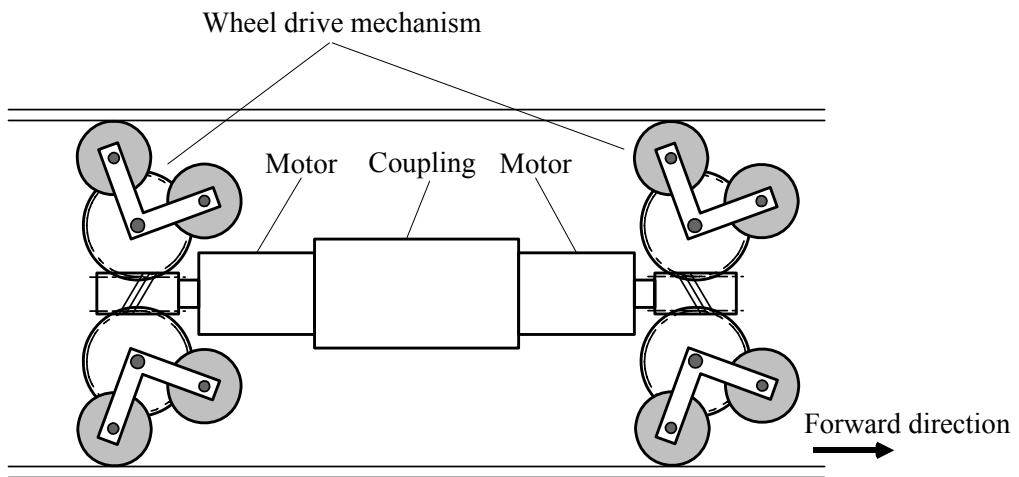
ただし、 z_W , z_G , z_P , u_G , u_P はそれぞれウォームの条数、太陽歯車の歯数、遊星歯車の歯数、ウォームと太陽歯車間の速比、太陽歯車と遊星歯車間の速比を表す。式(2.1)から、エネルギー保存則により、車輪のトルク τ_W とモータのトルク τ_M の間には次式の関係が成り立つ。

$$\frac{\tau_W}{\tau_M} = \frac{\eta_G \eta_P}{u_G u_P} \quad (2.2)$$

ただし、 η_G 、 η_P はそれぞれウォームと太陽歯車間、太陽歯車と遊星歯車間のエネルギー伝達効率である。



(a) Single drive type



(b) Double drive type

Fig.2.4 Driving form of the in-pipe mobile robots

2.3.3 細径化設計

遊星歯車式管径追従車輪走行機構は図 2.2, 図 2.3 に示すように主な構成要素が歯車機構とモータであることから, 小径の歯車とモータを使用することで細径化が可能となる. しかしながら, 電磁モータは細径化するとその発生トルクは体積に比例する値より著しく低下してしまい, 減速機構を組み合わせてトルク/自重比を大きくさせる必要がある. 特に小径の減速機においては, 減速比が大きくなるとその長さはモータよりも長くなり, 外径に対する駆動部の長さの比が大きくなり, 曲管走行に不利な構造となってしまう.

そこで, 1 インチ以下の管内移動ロボットには, 高減速比を有する減速機を内蔵したモータを用い, 減速機の部分をウォームと一体化させることでモータを含めた駆動部の全長を短くした車輪走行機構を提案した⁽⁴⁷⁾. 図 2.5 に細径化の設計を行った車輪走行機構の構造を示す. モータに装着された減速機の出力軸をウォームと一体化させ, 減速機の部分をウォームの内部に配置させている. 減速機は簡素な歯車構成で高減速比が得られる 3K 型不思議遊星歯車機構⁽⁴⁸⁾を採用した超小型の遊星歯車機構である. このような減速機を内蔵したモータを用いても駆動部の全長を長くすることなく, 管内走行に必要なトルクを減速機構を用いて得ることが可能になる.

ここで, 3K 型不思議遊星歯車機構は図 2.6 に示すように, 入力となる太陽歯車 a が遊星歯車 b とかみあい, 遊星歯車 b が同心かつ歯数が互いに異なる固定内歯車 c および回転内歯車 d と同時にかみあい, 回転内歯車 d から出力する. 通常 3 個の遊星歯車を使用するので合計 6 個の歯車から構成され, 減速比 1/60~1/1000 を得ることができる.

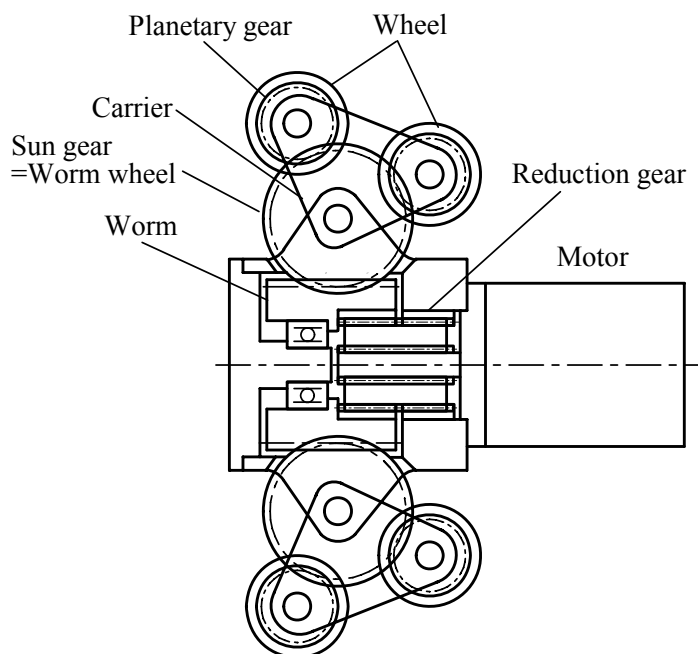


Fig.2.5 Wheel drive mechanism composed of reduction gear

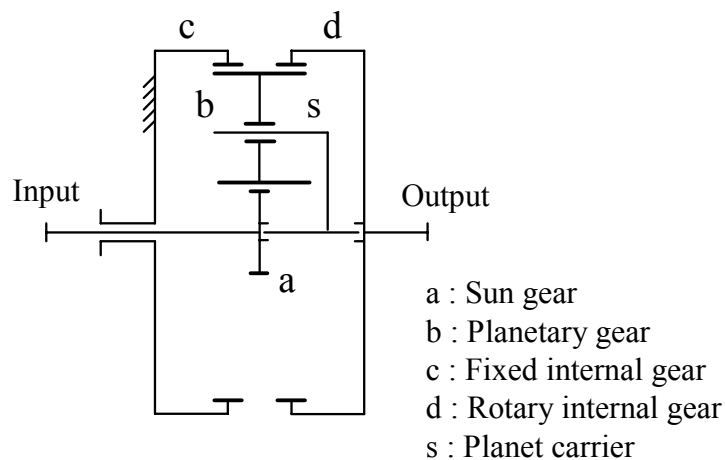


Fig.2.6 Configuration of 3K-type mechanical paradox planetary gear drive

2.4 管内走行機構の動作検証

図 2.7 に 1 インチ管用に試作した管内走行機構の外観を示す。太陽歯車，遊星歯車，車輪からなる車輪列は 3 組で構成した。電磁モータとそれに内蔵された減速機は新たに開発したものの⁽⁴⁹⁾であり，電磁モータは外径 5 mm，長さ 8 mm で，減速機はモジュール 0.05mm の小径歯車を用いた減速比 1/162 の 3K 型不思議遊星歯車減速機である。これらを組み合わせたアクチュエータの最大出力トルクは 4.65 mNm であり，このトルクがウォームを介して車輪に伝達させて管内走行を実現させている。図 2.7 に示す走行機構を用いて試作した 1 インチ管用の管内走行ロボットは外径 23 mm，長さ 110 mm，質量 16 g である。その走行性能は，最大速度 6 mm/s、最大牽引力 1 N であることを確認している。図 2.8 にアクリル製の 1 インチ配管内を走行しているロボットの様子を示す。

1 インチ用に提案した管内走行機構は，基本的な配管（水平，垂直，曲管）の走行が可能であり，ロボットの自重の約 6 倍の牽引力を有することが確認できた。また，図 2.9 に示すように，管中心の曲率半径が 120mm の 90 度エルボの通過が可能であった。よって，本管内走行機構は小口径管内移動ロボットの走行機構として有効であることを確認した。

基本構造が同じでサイズのみを変更して 3 インチ管用と 2 インチ管用それぞれの管内走行機構について設計試作を行った。図 2.10 に 3 インチ管用の管内移動ロボット^{(50),(51)}の外観を示す。図 2.11 に 2 インチ管用の走行機構⁽⁵²⁾の外観を示す。いずれの場合においても管内走行機構は，基本的な配管（水平，垂直，曲管）の走行が可能であることが確認された。

以上の結果から，小口径管内移動ロボットの走行機構と採用する遊星歯車式管径追従車輪走行機構は，配管口径が 1，2，3 インチ管で管内走行機構としての基本特性を有していることが確認でき，前述した基本仕様をほぼ満たしていることが検証できた。これまでに検証実験した遊星歯車式管径追従車輪走行機構の特性を表 2.2 に示す。



Fig.2.7 Photograph of the wheel drive mechanism for 1-inch pipes⁽⁴⁹⁾

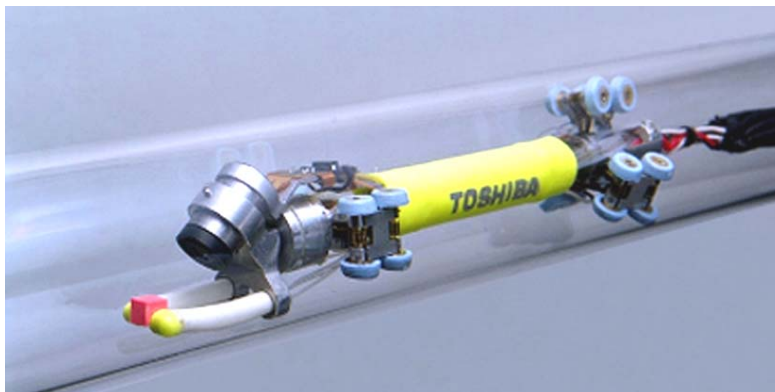


Fig.2.8 Photograph of the in-pipe mobile robot for 1-inch pipes⁽⁴⁹⁾



Fig.2.9 Photograph of the in-pipe mobile robot for 1-inch pipes⁽⁴⁹⁾



Fig.2.10 Photograph of the in-pipe mobile robot for 3-inch pipes^{(50),(51)}

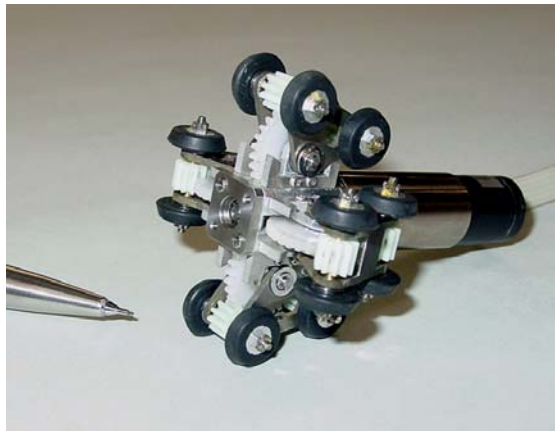


Fig.2.11 Photograph of the wheel drive mechanism for 2-inch pipes⁽⁵²⁾

Table 2.2 Characteristics of the wheel drive mechanisms using planetary gear drive

	1-inch	2-inch	3-inch
Applicable piping (Inside diameter)	24 mm	48 mm	sch40 3B 78.1 mm
Mechanism size	Diameter 23 mm Length 17 mm	Diameter 45 mm Length 66 mm	Diameter 71 mm Length 66 mm
Running speed	6 mm/s	11 mm/s	24 mm/s
Vertical pipes	○	○	○
Bent pipes	○	○	○

2.5 まとめ

本章では、小口径管内移動ロボットの基本仕様を明らかにして、遊星歯車式管径追従車輪走行機構が1, 2, 3インチ管に適用可能であるかの基礎的検討を行った。そして、1, 2, 3インチ用の遊星歯車式管径追従車輪走行機構をそれぞれ試作し、走行実験を行い本走行機構の有用性を実験的に検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 遊星歯車式管径追従車輪走行機構は、共通の設計で1, 2, 3インチ管の管内走行機構として有用であることがわかった。
- (2) 遊星歯車式管径追従車輪走行機構の歯車機構と動力源を小型にすることで1インチ以下の管内移動ロボットの走行機構に適用できることを確認した。

第3章 直管走行時の力学解析と構成要素の特性

3.1 はじめに

本章では、遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた管内移動ロボットの力学特性を明らかにするための第一段階として、直管走行時の力学特性について検討する^{(52),(53)}。この機構は車輪を管壁に押付けつつ管内を走行でき、異なる管径に対しても対応できることの検討は試作機の実験走行のみであり、走行時の力学特性についての検討が行われておらず、管内移動ロボットの設計を行うには、走行時の現象や駆動トルクの解明などロボットの運動特性ならびに力学特性の理論的および実験的検討が必要である。そこで、直管における基本走行の力学特性を明らかにする。まず3.2節では直管走行時の力学解析を行い、管軸方向の負荷およびキャリア角度と車輪の管壁への押付け力の関係を検討する。3.3節では車輪走行機構の構成要素である歯車列のエネルギー伝達効率と車輪と管壁との静止摩擦係数を実験で測定する。3.4節では遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた管内移動ロボットを試作して直管走行時の特性を測定し、モータトルクから管内移動ロボットの牽引力を試算できる関係式を導き、無負荷時のモータトルクとモータ特性から最大牽引力を求める。そして、管内移動ロボットの直管走行時の走行特性を明らかにする。

3.2 直管走行時の力学解析

車輪走行機構は本体部の中心が管軸を走行すると仮定し、管断面は真円形状とし、直管内を走行する車輪走行機構の力学解析モデルを図3.1に示す。各車輪列は管軸に対して対称に配置されているとし1つの車輪列からなる平面モデルとした。図3.1に示すように座標系をとり、点B、G、C、Wはそれぞれ、本体の中心軸と太陽歯車の支持部材との交点、遊星歯車の回転中心、キャリアの重心、車輪の回転中心で、これらの座標はそれぞれ (x_B, y_B) 、 (x_G, y_G) 、 (x_C, y_C) 、 (x_W, y_W) とする。λ、lはキャリアの角度と長さ、 r_W 、 r_G 、 r_P はそれぞれ車輪の半径、太陽歯車のピッチ円半径、遊星歯車のピッチ円半径である。駆動するためのトルクは太陽歯車に本体から作用するトルクで τ_G とし、太陽歯車、車輪それぞれの角速度を ω_G 、 ω_W とする。本体に負荷Lが作用した状態で走行しているときの機構に作用する力は図3.1に示すように定義する。 P_x 、 P_y は車輪と管壁の接触点での車輪に作用する力のx、y成分、 $F_{W,x}$ 、 $F_{W,y}$ は点Wにおける車輪に作用する力のx、y成分、 $F_{C,x}$ 、 $F_{C,y}$ は点Gにおけるキャリアと太陽歯車の間のキャリアに作用する力のx、y成分、 $F_{G,x}$ 、 $F_{G,y}$ は点Gにおける太陽歯車と本体の間の太陽歯車に作用する力のx、y成分である。本体の点Bは管軸を走行する仮定から、本体には対称の位置に配置された車輪列から力とモーメントを受け、その力とモーメントにつきあうような力とモーメントが作用する。本体に作用する力とモーメントをそれぞれ $F_{B,y}$ 、 τ_B とする。歯車間の太陽歯車に作用するピッチ円接線方向力を F_T 、太陽歯車に作用する半径方向力を $F_T \tan \alpha_g$ とし、 α_g は歯車の基準圧力角とする。本体、太陽歯車および車輪の重心はそれぞれ点B、G、Wにあるとし、その質量と慣性モーメントを各々 m_B 、 I_B 、 m_C 、 I_C 、 m_G 、 I_G 、 m_W 、 I_W とする。

車輪走行機構が直管内を走行する場合の、本体、太陽歯車、キャリアおよび車輪の並進および回転の運動方程式をまとめると次式となる。

$$m_B \ddot{x}_B = -F_{G,x} - F_{C,x} - L \quad (3.1)$$

$$m_B \ddot{y}_B = F_{B,y} - F_{G,y} - F_{C,y} = 0 \quad (3.2)$$

$$I_B \ddot{\theta}_B = \tau_B - \tau_G + b(-F_{G,x} - F_{C,x}) + a(-F_{G,y} - F_{C,y}) = 0 \quad (3.3)$$

$$m_C \ddot{x}_C = F_{C,x} - F_{W,x} \quad (3.4)$$

$$m_C \ddot{y}_C = F_{C,y} - F_{W,y} \quad (3.5)$$

$$I_C \ddot{\lambda} = l_h F_{C,y} C_\lambda - l_h F_{C,x} S_\lambda + l_h F_{W,y} C_\lambda - l_h F_{W,x} S_\lambda \quad (3.6)$$

$$m_G \ddot{x}_G = F_{G,x} - F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) \quad (3.7)$$

$$m_G \ddot{y}_G = F_{G,y} + F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g) \quad (3.8)$$

$$I_G \ddot{\theta}_G = \tau_G - F_T r_G \quad (3.9)$$

$$m_W \ddot{x}_W = F_{W,x} + F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) + P_x \quad (3.10)$$

$$m_W \ddot{y}_W = F_{W,y} - F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g) + P_y \quad (3.11)$$

$$I_W \ddot{\theta}_W = -F_T r_P + r_W P_x \quad (3.12)$$

ただし、 \ddot{x} 、 \ddot{y} 、 $\ddot{\theta}$ はそれらの添え字に対応する運動物体の x 、 y 方向の加速度と重心まわりの角加速度である。 $\ddot{\lambda}$ はキャリアの点 G まわりの角加速度、 S_λ 、 C_λ 、 l_h はそれぞれ $S_\lambda = \sin \lambda$ 、 $C_\lambda = \cos \lambda$ 、 $l_h = l/2$ である。また、 a 、 b は点 B、G 間の x 、 y 方向の距離である。

図 3.2 に示すように遊星歯車機構における太陽歯車と遊星歯車には次式の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \theta_W &= u_P \Delta \theta_G + \Delta \theta_G \\ \dot{\theta}_W &= -u_P \dot{\theta}_G + (u_P + 1) \dot{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

ただし、 $\Delta \theta_W$ 、 $\Delta \theta_G$ は車輪と太陽歯車の微小角変位、 $\dot{\theta}_W$ 、 $\dot{\theta}_G$ は車輪と太陽歯車の角速度、 $\dot{\lambda}$ はキャリアの角速度、 u_P は遊星歯車と太陽歯車間の速比である。車輪がすべらずに転がる条件と車輪が等速運動している条件は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_W &= r_W \dot{\omega}_W = 0 \\ \ddot{\theta}_W &= \ddot{\theta}_G = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

式(3.13)と式(3.14)を式(3.1)～(3.12)に代入して整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned}
& -F_{G,x} - F_{C,x} = L \\
& -F_{G,y} - F_{C,y} + F_{B,y} = 0 \\
& \tau_B - \tau_G - bF_{G,x} - aF_{G,y} - bF_{C,x} - aF_{C,y} = 0 \\
& F_{C,x} - F_{W,x} = 0 \\
& F_{C,y} - F_{W,y} = 0 \\
& -l_h S_\lambda F_{C,x} + l_h C_\lambda F_{C,y} - l_h S_\lambda F_{W,x} + l_h C_\lambda F_{W,y} = 0 \\
& F_{G,x} - F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) = 0 \\
& F_{G,y} + F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g) = 0 \\
& \tau_G - F_T r_G = 0 \\
& F_{W,x} + F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) + P_x = 0 \\
& F_{W,y} - F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g) + P_y = 0 \\
& -F_T r_P + r_W P_x = 0
\end{aligned} \tag{3.15}$$

そして、式(3.15)を行列形式で表すると次式となる。

$$\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -1 & -b & -a & -b & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_h S_\lambda & l_h C_\lambda & -l_h S_\lambda & l_h C_\lambda & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S_\lambda + C_\lambda \tan \alpha_g & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_G & 0 \\
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -C_\lambda - S_\lambda \tan \alpha_g & 0 \\
r_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_P & 0
\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ \tau_G \\ F_{G,x} \\ F_{G,y} \\ F_{C,x} \\ F_{C,y} \\ F_{W,x} \\ F_{W,y} \\ F_{B,y} \\ F_T \\ \tau_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

式(3.16)の連立方程式を解けば車輪走行機構に作用する力とモーメントが求められる。車輪に作用する力 P_x , P_y は次式のように求められ、他の解析の結果は付録 A に記載する。

$$P_x = L \tag{3.17}$$

$$P_y = L \left[\tan \lambda + \frac{r_W}{r_P} (S_\lambda \tan \lambda + C_\lambda) \right] \tag{3.18}$$

すなわち、 P_x が車輪走行機構の推進力であり、 P_y が車輪の管壁への押付け力である。負荷 L に対する車輪押付け力の比 P_y/L は $r_W/r_P = 1$ の時が最大となり、その条件でキャリア角度と車輪押付け力の比の関係を図 3.3 に示す。公転角度が小さい範囲では押付け力の変化

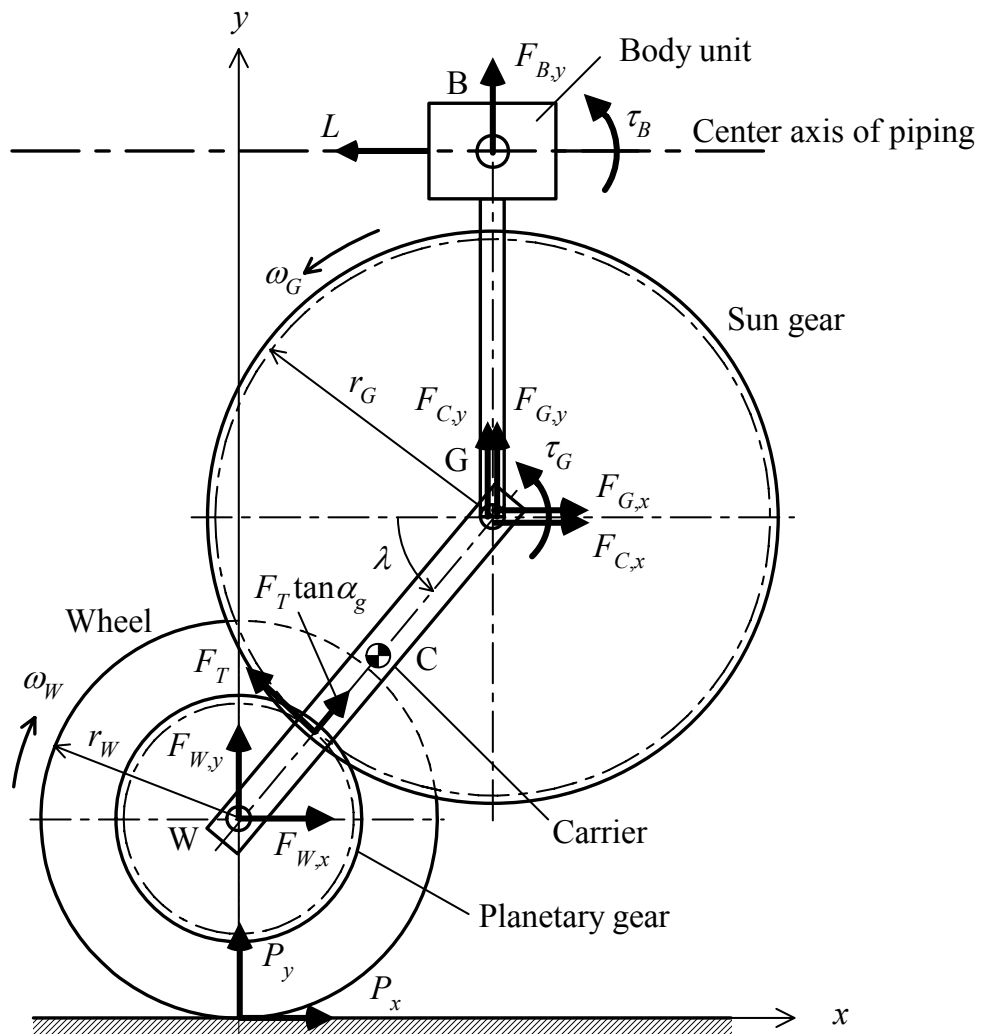
は小さいが公転角度が 75° を越えると急激に押付け力が大きくなることがわかる。車輪と管壁の静止摩擦係数を μ_s とすると、車輪が管壁に対してすべりがなく走行できる条件は次式となる。

$$\mu_s > \frac{L}{P_y} \quad (3.19)$$

走行時の太陽歯車のトルク τ_G と車輪を駆動させるトルク τ_W は次式で与えられる。

$$\tau_G = F_T r_G = \frac{r_W r_G}{r_P} L \quad (3.20)$$

$$\tau_W = \tau_G \frac{r_P}{r_G} = L r_W \quad (3.21)$$



- τ_B :Moment of body
- τ_G :Torque of sun gear
- ω_G :Angular velocity of sun gear
- ω_W :Angular velocity of wheel
- λ :Carrier angle

Fig. 3.1 Static analysis model of the wheel drive mechanism

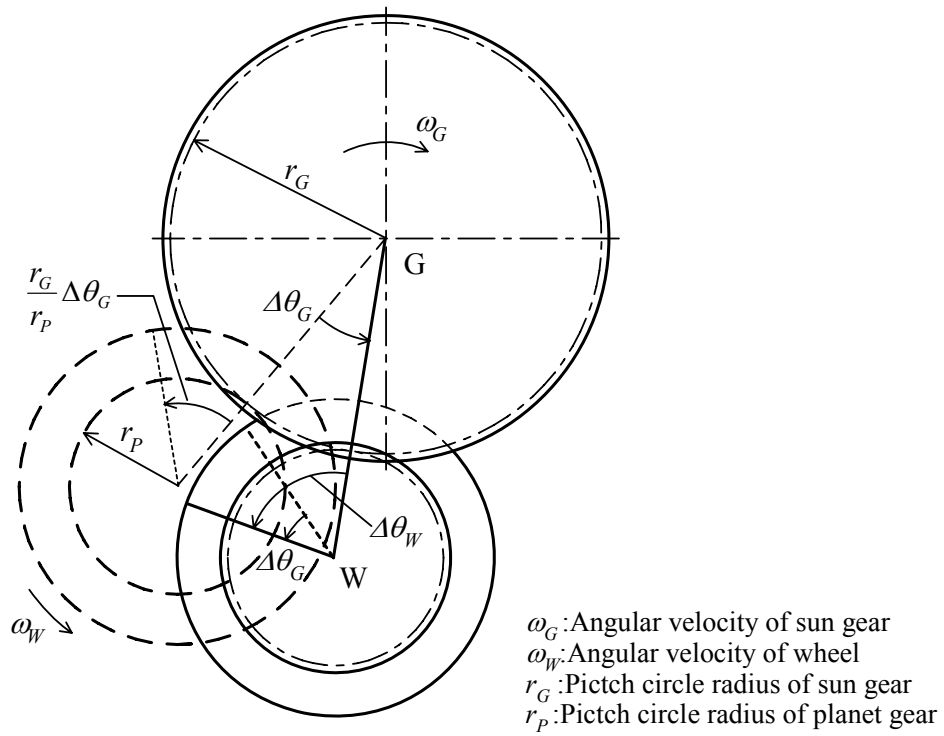


Fig. 3.2 Kinematic analysis model of planetary gear drive

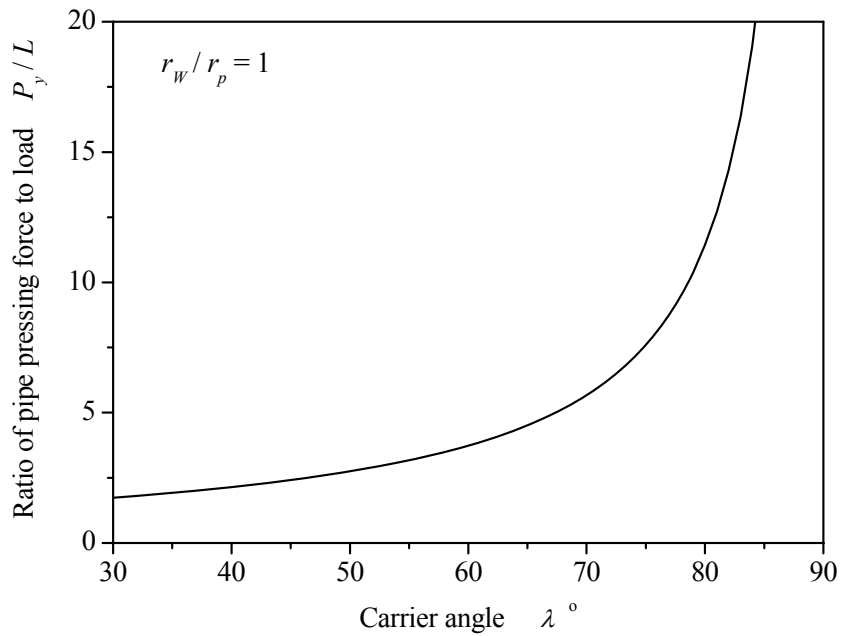


Fig. 3.3 Relation between carrier angle and ratio of pipe pressing force to load

3.3. 車輪走行機構の構成要素の特性

3.3.1 歯車列のエネルギー伝達効率

歯車のエネルギー伝達効率 η_G , η_P について検討する. 歯車機構のウォームギヤの効率 η_G は文献(54)より次式のようになる.

$$\left. \begin{aligned} \eta_G &= \frac{\tan \gamma_w}{\tan \gamma_w + \rho} \\ \rho &= \tan^{-1} \frac{\mu}{\cos \alpha_w} \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

ただし, γ_w , α_w , μ はウォームの進み角, 圧力角, 歯面摩擦係数である. 3.4 節の試作機に用いるウォームは, 軸方向モジュール 0.5mm, 条数 1, 歯先円直径 6mm である. 歯面摩擦係数 μ は樹脂製歯車でかつ小径であり文献(55) から 0.2~0.3 と仮定する. ウォームの進み角は 0.1rad であることからその効率は式(3.22)から 23~32%程度と推定できるが, 実験でその妥当性を確認する.

モータ出力軸に直結されたウォームとそれと噛みあう太陽歯車間の伝達効率 η_G は, 太陽歯車のトルクを T_{OUT} , ウォームのトルクを T_{IN} として, $\eta_G = u_G \cdot T_{OUT} / T_{IN}$ より算出する. 測定はヒステリシスブレーキで負荷を与える市販の動トルク測定装置を用いた. 太陽歯車にはモジュール, 歯数, 圧力角などの諸元が同じはずば歯車と平歯車の2種類を用いた. ただし, ウォームとかみ合うウォームホイールは, はずば歯車を駆動できることからウォームとははずば歯車は噛みあうことが可能であるが, ウォームと平歯車のかみあいについては実験で確認する必要がある. 図 3.4 に樹脂製のモジュール 0.5mm, 歯数 30, 圧力角 20°の平歯車とはずば歯車の場合の出力トルクと効率の関係を示す. 効率ははずば歯車の方が平歯車より若干高く, それぞれの効率は, 24%, 20%程度であった. 実験結果からはずば歯車は $\mu = 0.3$, 平歯車は $\mu = 0.35$ とした場合, 実験結果は式(3.22)の試算結果と一致する. 太陽歯車と遊星歯車の伝達効率 η_P は, 歯車軸の関係は平行となるので歯面摩擦係数を 0.2 として文献(48) より試算し, $u_P = 0.5 \sim 3$ の範囲では $\eta_P = 0.95$ とした. よって, 歯車列のエネルギー伝達効率はそれぞれ $\eta_G = 0.2$, $\eta_P = 0.95$ として扱うことにする.

3.3.2 車輪と管壁の静止摩擦係数

車輪が管壁をすべらないで走行する場合の静止摩擦係数 μ_S の最小値は式(3.19)の関係から計算できるが, 実験でその妥当性を確認する. 図 3.5 に実験装置の概略図を示す. 実機と同じ構成のゴム車輪とアクリル配管を用いて, 車輪に垂直荷重 N を与える. その状態でアクリル配管を引張り, その時の引張荷重 T_F を計測する. そして, 静止摩擦係数 μ_S は次式から算出する.

$$\mu_S = T_F / N \quad (3.23)$$

計測した荷重 T_F は移動開始時と移動中においてわずかではあるが差が生じており, 前者が静止摩擦力で, 後者が動摩擦力であると考えられ, 静止摩擦係数 μ_S の算出には後者の値を用いる.

図 3.6 にアクリル配管に 3.4 節の試作機で使用する車輪を用いて行った実験結果を示す。静止摩擦係数 μ_s はほぼ一定の値となっており、その平均は約 0.7 で、最小は 0.62 である。この実験より、車輪とアクリル製配管の管壁との静止摩擦係数 μ_s は 0.6 程度であることが確認できた。

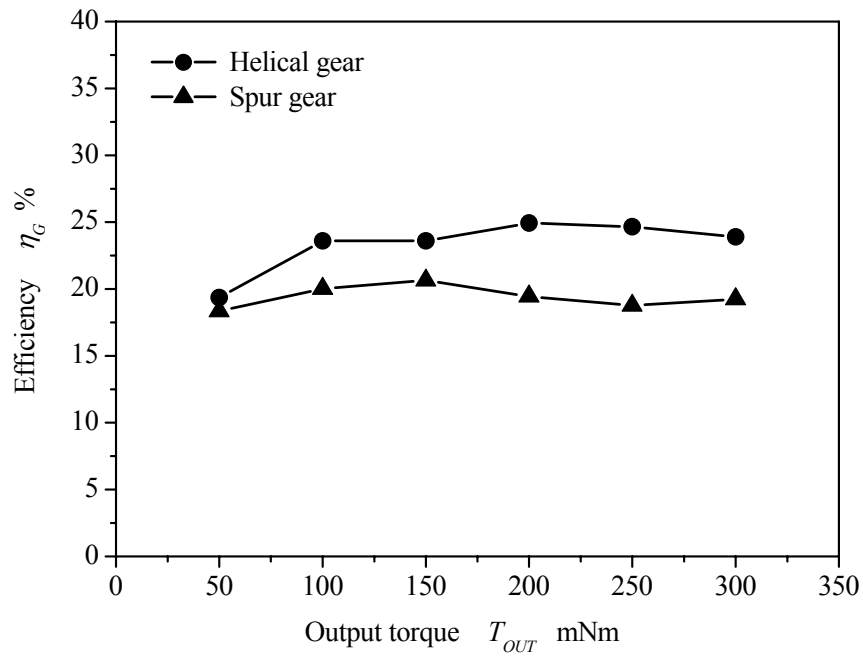


Fig. 3.4 The efficiency between worm and sun gear

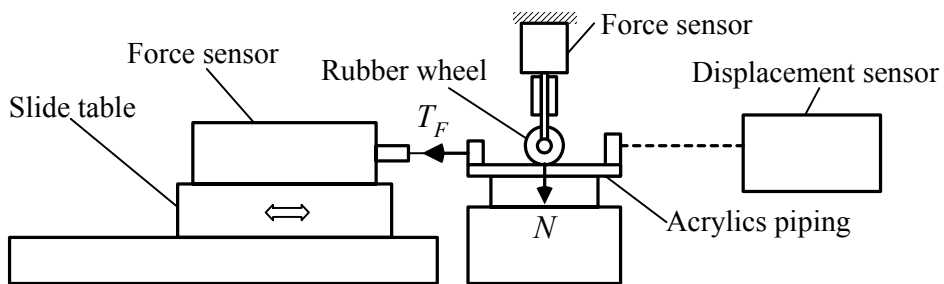


Fig. 3.5 Experimental apparatus for friction coefficient

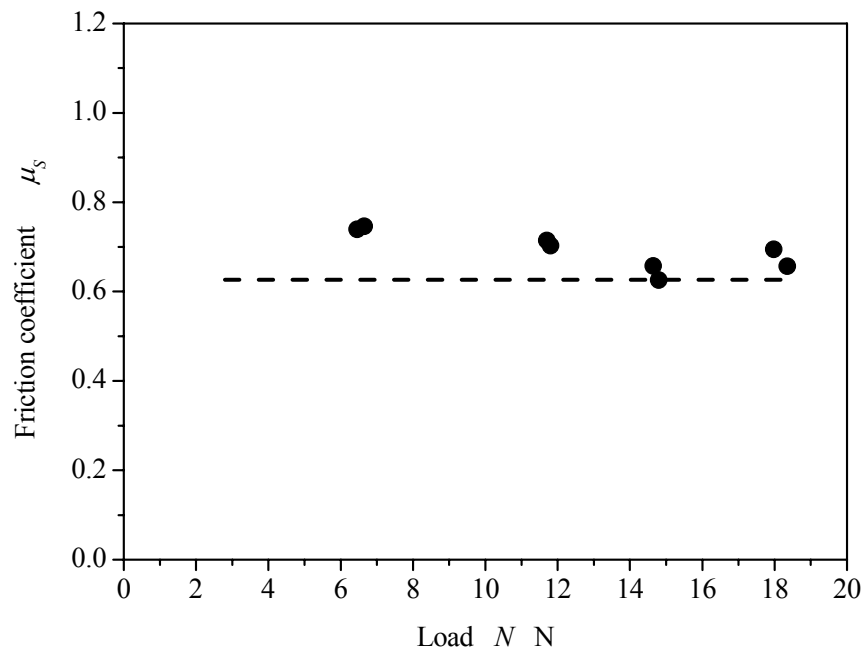


Fig. 3.6 Relation between friction coefficient and load

3.4 基本走行実験および考察

3.4.1 基本走行実験用試作機

図 3.7 に実験に用いた管内移動ロボットの概略断面図を示す. 寸法と質量は, 外径 45mm, 長さ 130mm, 質量 95g である. 使用したウォームは 3.3 節の諸元と同じで, 太陽歯車, 遊星歯車は平歯車とし, モジュールは $m = 0.5\text{mm}$ で歯数はそれぞれ, 30, 10 とした. 歯車はウォームを含めて材料は樹脂製である. モータはギヤヘッド, エンコーダを装着した DC サーボモータで, 寸法は外径 14mm, 長さ 43mm である. モータ特性は定格電圧 6V でトルク定数 229 mNm/A である. 図 3.8 に実測したモータ特性のグラフを示す. 車輪は金属製の円筒部材の周囲にゴム (ネオプレン硬度 70 相当) をコーティングして製作した. 最大外径約 10mm, 幅 2.5mm の円錐形状とし, 車輪の幅方向の中心での半径は 4.7mm であり, この値を車輪の半径とした. ガイドユニットはアーム先端に取り付けたボールベアリングをねじりコイルばねによって押付ける構造のものとした. 管壁との摺動抵抗を小さくするためにボールベアリングを使用した. また, サーボモータに供給するケーブルは本体部のカップリングに固定して, 外部に設けた制御回路に接続した. 図 3.9 に実験に用いた管内移動ロボットの外観を示す.

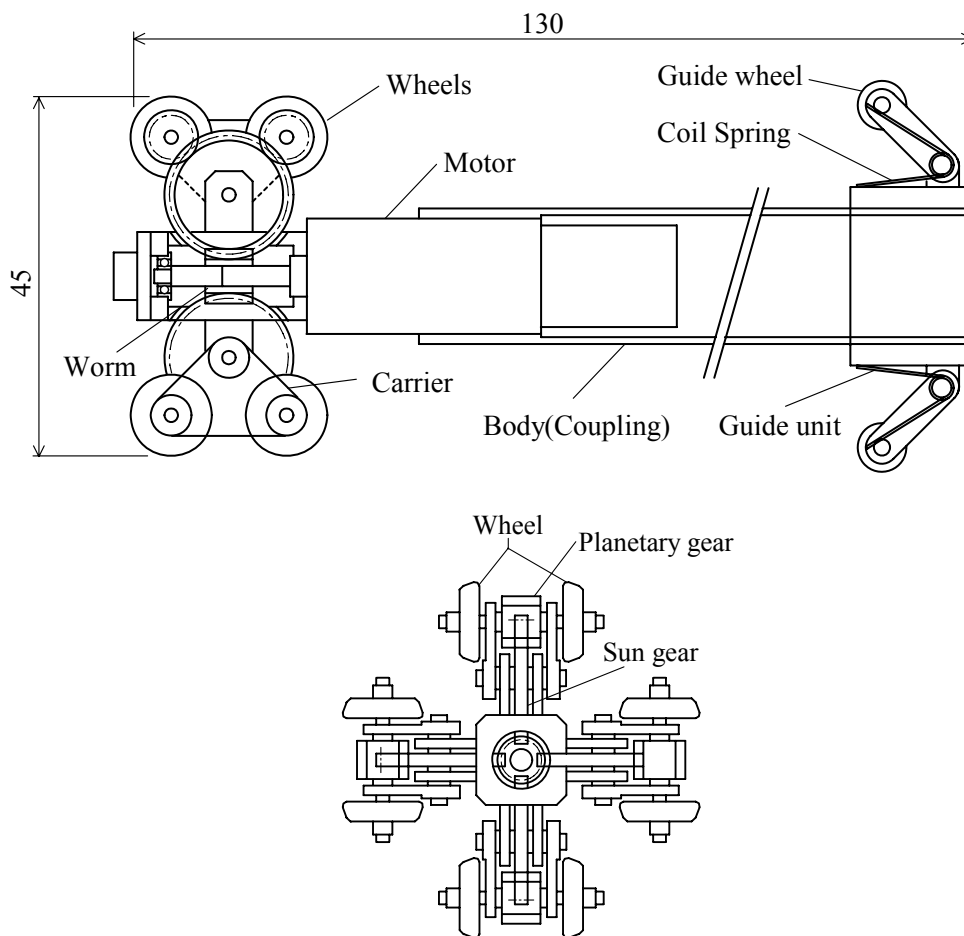


Fig. 3.7 Structure of the in-pipe mobile robot

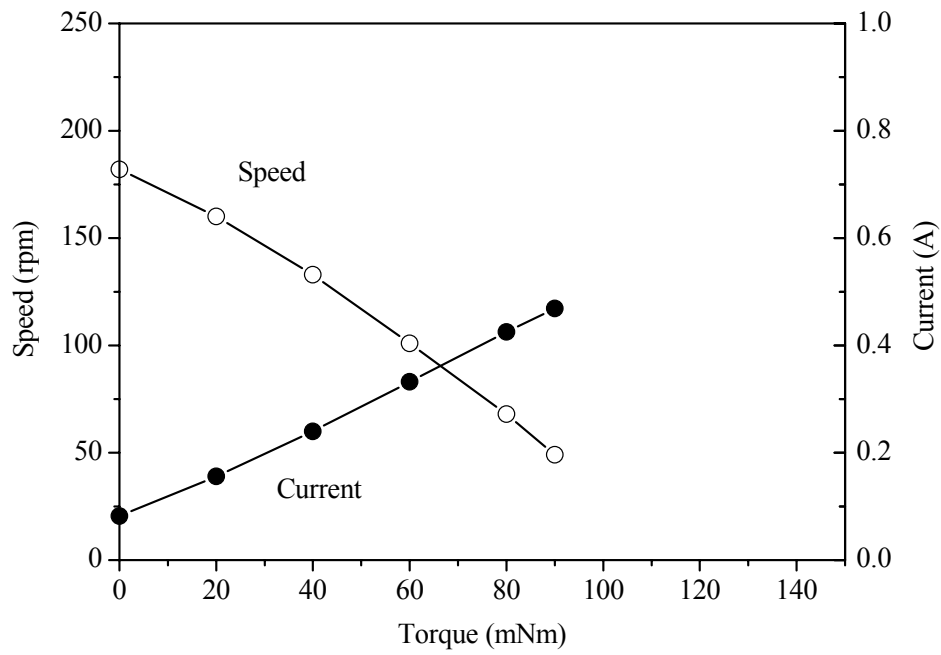


Fig.3.8 Relations torque-speed and torque-current of the DC motor



Fig.3.9 Photograph of the in-pipe mobile robot

3.4.2 基本走行実験

管内径の異なる3種の亚克力配管を準備し、管内移動ロボットには重りによる一定負荷を与え、移動速度 V および移動距離 D をワイヤとプーリを用いて計測用エンコーダで計測した。モータの角速度 ω_M はモータ内蔵のエンコーダ、モータの駆動トルクはモータ電流からそれぞれ計測し、データの全ては PC に保存し処理した。亚克力配管は管内径(ID)が 46mm, 48.5mm, 50mm のものを用いた。

モータの制御は位置と速度の目標値をトルク指令へフィードフォワードさせる制御系⁽⁵⁶⁾を用いた。モータの制御ブロック図は付録 B に記載する。管内径が異なる3種の管内で、負荷 L に対する管内移動ロボットの移動速度 V 、移動距離 D 、モータ駆動トルク τ_M を測定した。実験での目標移動距離は 100mm に設定した。管内径が変化するとキャリア角度 λ が変化し、管内径 46mm, 48.5mm, 50mm でのキャリア角度 λ はそれぞれ 47° , 60° , 70° となる。

図 3.10, 3.11 に負荷 L に対するロボットの移動速度 V とモータ駆動トルク τ_M の関係を示す。車輪と管壁にすべりがなく、車輪の変形がなく理想的な転がり運動を行うとすれば、移動速度 V は次式より得られる。

$$V = r_w \omega_M u_G u_P \quad (3.24)$$

図 3.10 中の破線は、測定したモータ角速度 ω_M を式(3.24)に代入してプロットしたものである。移動速度は負荷に関係なく一定であり、速度制御されて動作している。式(3.24)から、管内移動ロボットのエネルギー収支を考えれば、次式が成立する。

$$\tau_M \omega_M = LV + F_R V \quad (3.25)$$

ただし、 F_R は歯車列の伝達損失などを含んだ抵抗力である。式(3.25)を変形すると次式が得られる。

$$\tau_M = \frac{V}{\omega_M} L + \frac{V}{\omega_M} F_R \quad (3.26)$$

図 3.11 のモータトルク τ_M と負荷 L の実験結果から最小自乗近似を行って、式(3.26)の傾きと切片を求めた。その結果、切片は 46.1mNm であり、抵抗力は $F_R = 23\text{mNm}$ となる。このことから、本移動機構は歯車列等を駆動させるためのトルクが大きい機構であることがわかる。図 3.11 の実験結果と式(2.2)より車輪の駆動トルクは求められる。図 3.12 にその結果を示す。実験結果は式(3.21)より求めた理論値とほぼ一致しており、解析式および歯車伝達効率の妥当性が確認できた。

次に、負荷 L に対するロボットのスリップ比率 e の関係を検討した。スリップ比率 e は次式より算出し、結果を図 3.13 に示す。

$$e = \frac{D_r - D}{D} \times 100 \quad (3.27)$$

ただし、 D_r は計測用エンコーダから算出した移動距離である。キャリア角度 λ が 47° 場

合のスリップ比率は他と比べて大きく、車輪の押付け力の差によるもので、微視的には車輪と管壁との接触領域ですべりが発生していると考えられる。しかしながら、実験の範囲内は管内移動機構としては実用上問題にならないレベルであることから、マクロ的にはスリップがほとんどない走行であると扱える。負荷に比例してスリップ比率は大きくなっているがこれは車輪の弾性変形によるものと考えられる。

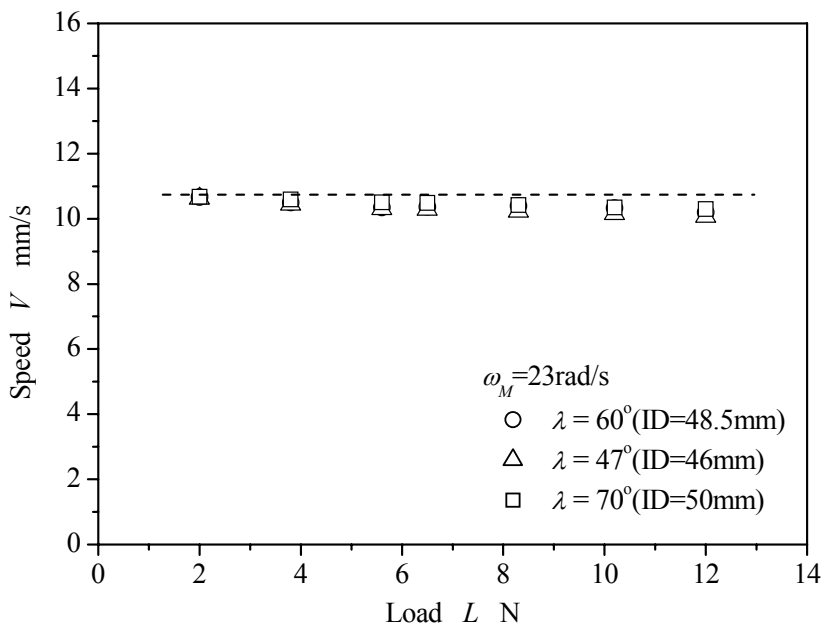


Fig. 3.10 Relation between load and speed of in-pipe mobile robot

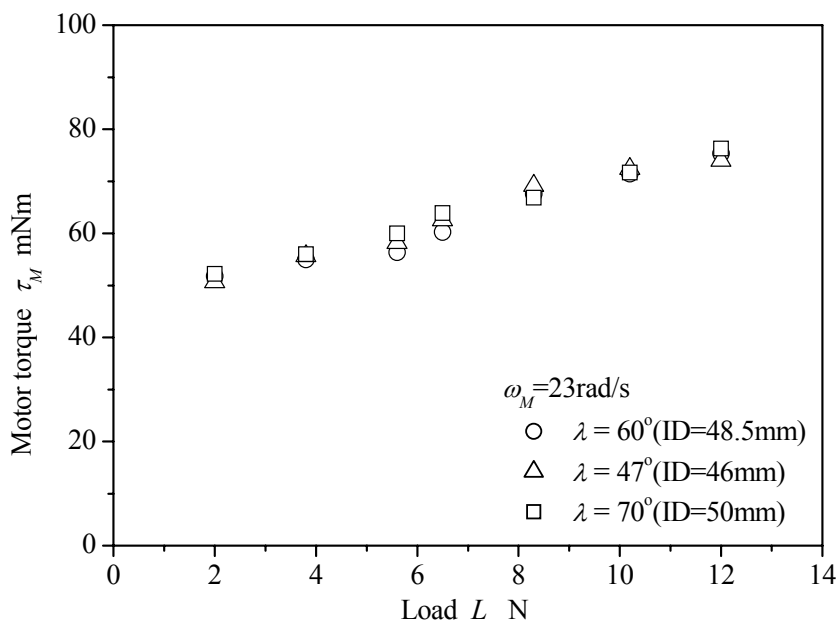


Fig. 3.11 Relation between load and motor torque of in-pipe mobile robot

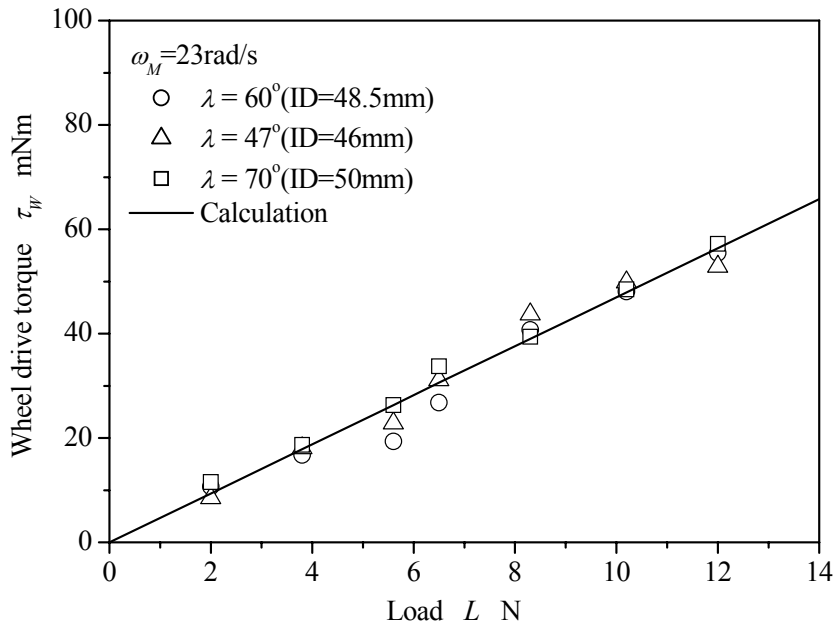


Fig. 3.12 Relation between load and wheel drive torque of in-pipe mobile robot

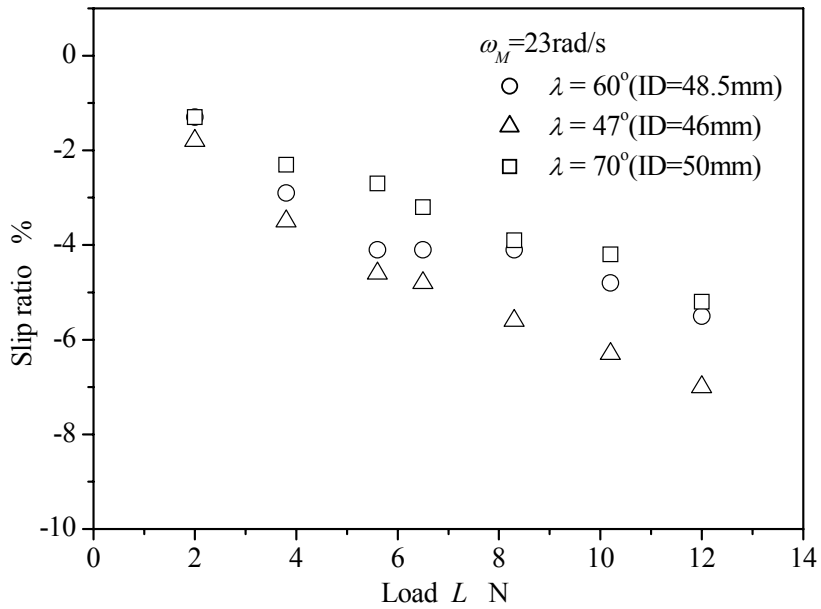


Fig. 3.13 Relation between load and slip ratio of in-pipe mobile robot

3.4.3 車輪の管壁への押付け力

車輪の管壁への押付け力はアクリル配管の外周面に図 3.14 に示すようにひずみゲージを等間隔に 4 箇所接着させて、そのひずみから車輪の押付け力を測定した。ひずみゲージは対向するゲージ SG1 と SG3 でブリッジを構成してそれらのひずみはアンプを介して計測した。ひずみゲージの校正は図 3.14 に示すように管内壁に 1 点集中荷重が作用する場合と 4 点集中荷重が作用する場合の SG1 と SG3 点での応力を有限要素法解析で試算して両者の関係を明らかにした。そして、1 点集中荷重が作用する場合で荷重と出力電圧の関係を求めて、4 点集中荷重の場合の校正係数を決定した。ひずみゲージの校正係数を決定する校正方法については付録 C に記載する。

車輪が走行する位置とひずみゲージの位置が一致するように管内移動ロボットを走行させ、その時のひずみゲージからの出力波形を図 3.15 に示す。この出力波形のピーク値から求めた車輪の管壁への押付け力の結果を図 3.16 に示す。車輪の管壁への押付け力は負荷に比例することがわかり、その実験結果は式(3.18)で求めた理論値とほぼ一致しており、解析結果の妥当性が検証できた。押付け力は式(3.18)よりキャリア角度と負荷の関数であり、モータトルクには関与しない。そして、ロボットは自重の約 80 倍の押付け力が車輪に作用しても速度低下せずに走行できることが確認できる。

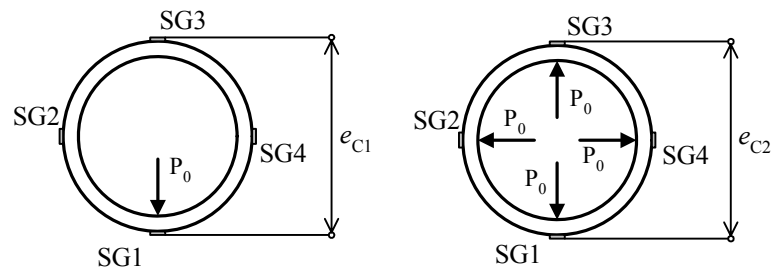
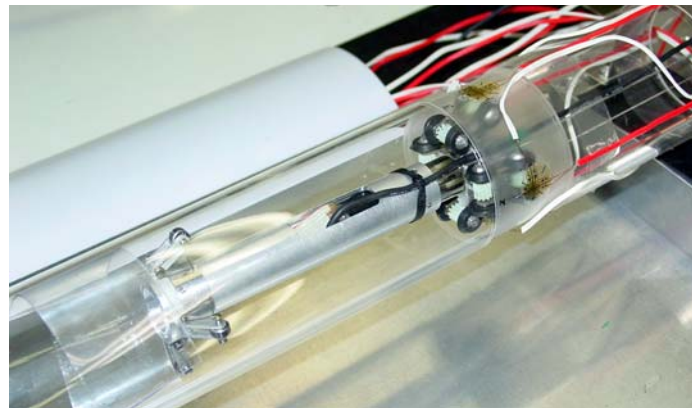


Fig. 3.14 Measurement of pressing force

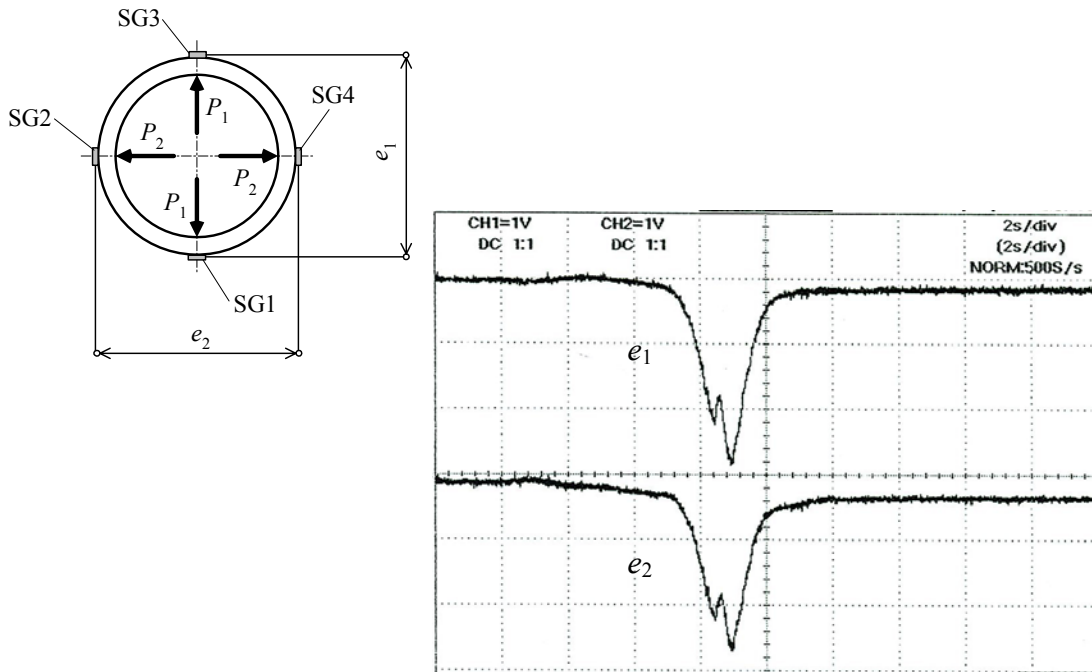


Fig. 3.15 Output signals of strain gauges

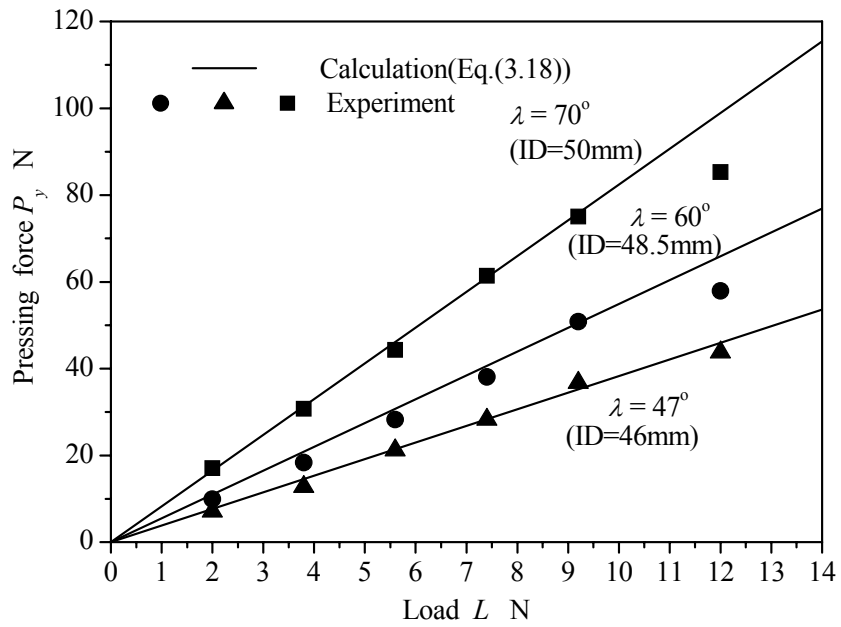


Fig. 3.16 Relations between load and pressing force

3.4.4 牽引力

ロボットの牽引力は負荷 L と同値であり，式(3.21)から求められる．式(2.2)と式(3.21)からモータトルクと牽引力 F の関係は次式で与えられる．

$$F = \frac{\eta_G \eta_P}{u_G u_P} \frac{1}{r_W} (\tau_M - \tau_{M,0}) \quad (3.28)$$

ただし， $\tau_{M,0}$ は式(3.26)の切片で，無負荷時のモータトルクである．図 3.17 にキャリア角度 $\lambda = 60^\circ$ の場合のモータトルクと牽引力 ($=L$) の関係を示す．実験結果は式(3.28)による計算値とよく一致しており，モータの最大トルクとロボットの無負荷時トルクから最大牽引力を試算できる．本試作では最大移動速度 10.1mm/s，最大牽引力 20N が得られており，その値は自重の約 20 倍に相当する．

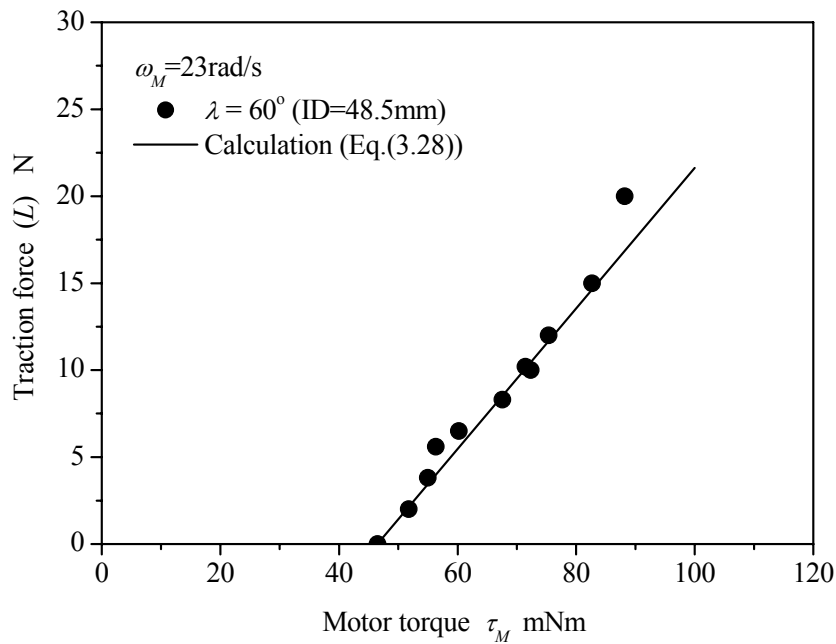


Fig. 3.17 Traction force of mobile robot

3.4.5 細径化の検討

本機構は歯車を小径にすることで細径化が可能であり試作機を基に細径化の設計を行いロボットの最大牽引力の試算を試みた。

使用するモータ径は管径の1/4程度、無負荷時トルクはロボット径の2乗に比例すると仮定し、牽引力を試算した結果を図3.18に示す。直管配管であれば、管径12mmのサイズで最大牽引力が約2Nである試算結果が得られた。管内径20mm以下に適用できる管内移動ロボットの報告は少なく、牽引力の結果が示されたのは文献(46)であり、それとの比較を行った。細径化時の試算結果は図中の文献(46)の値(▲記号)より大きく小口径配管の走行機構として本機構は優れていると言える。

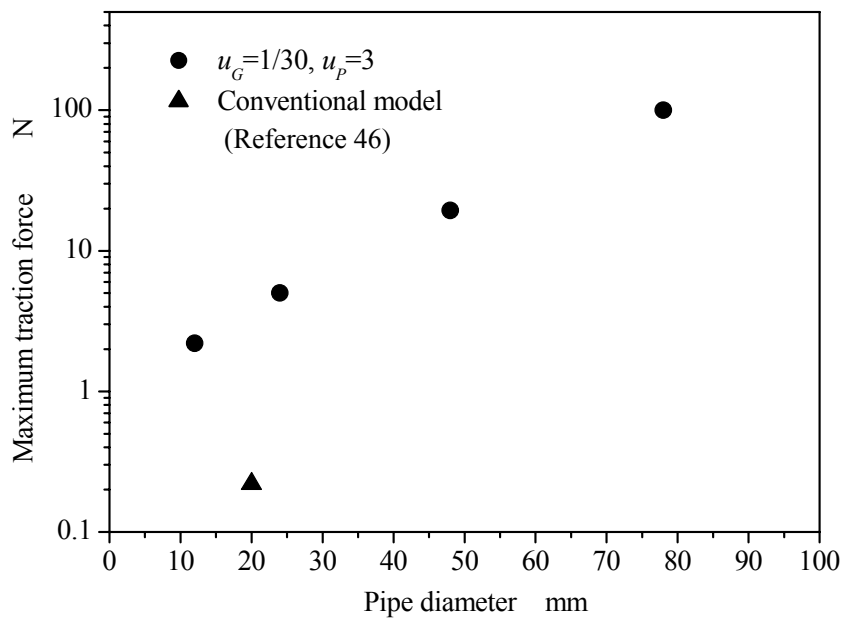


Fig. 3.18 Relations between pipe diameter and maximum traction force

3.5 まとめ

遊星歯車式管径追従車輪走行機構を利用した小口径内移動ロボットの直管走行時の力学特性に関して、理論解析と実験検証を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 管軸方向の負荷およびキャリア角度の大きさと車輪の管壁への押付け力の関係式を導き、試作機による実験でその妥当性を実証した。
- (2) モータトルクからロボットの牽引力を試算できる関係式を導き、無負荷時のモータトルクとモータ特性から最大牽引力の試算を可能にした。
- (3) 試作した外径 45mm、長さ 130mm のロボットは、直管を自重の約 2~20 倍の牽引力で走行可能であり、負荷に対する走行速度、モータトルク、車輪の管壁への押付け力などの車輪走行機構の走行特性を実験により明らかにした。
- (4) 本機構は歯車を小径にすることで細径化が容易であるので、細径化時の最大牽引力を試算したら適用管内 12mm で約 2N であった。

第4章 曲管走行時の走行特性

4.1 はじめに

遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた管内移動ロボットの走行特性を明らかにするための第二段階として、曲管走行時の走行特性について検討する。小口径配管において曲管部は配管の設置方向を変えるために多く用いられており、自走式の管内移動ロボットには曲管内部の通過は必須の機能である。しかしながら、細径管を対象とし、曲管内の通過を考慮した管内移動ロボットの開発例^{(35),(36)}はわずかしかなかく、曲管を通過するための管内移動ロボットの設計を行うのに必要な、曲管走行時の現象や駆動トルクの解明などの車輪走行機構の力学特性の検討はほとんど行われていない。そこで本章では、遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた管内移動ロボットが曲管走行を可能とするように改良し、そのロボットの曲管走行時の運動特性・力学特性を明らかにする。まず4.2節では第3章で試作・実験した管内移動ロボットを曲管に適用できるように車輪走行機構とガイドユニットの間にフレキシブルカップリングを組み込んだ曲管対応ロボットを設計する。4.3節では設計したロボットの曲管走行時の力学解析を行い、曲管走行時の駆動トルクと直管走行時の駆動トルクの関係性を明らかにする。4.4節では試作した曲管対応ロボットで曲管走行時の特性を測定し、曲管の通過を考慮した管内移動ロボットの機構の設計指針を述べる。

4.2 曲管対応管内移動ロボットの設計

第3章で試作・実験した管内移動ロボットは車輪走行機構とその先端部に装着したガイドユニットを円筒形状のカップリングで接続されている。このカップリングはロボットの本体部であり両端に取り付けた車輪走行機構とガイドホイールの中心軸が管軸に対して平行になるように支持している。車輪走行機構とガイドユニットの中心軸と本体部の中心軸が管軸の接線と平行となることでロボットは曲管内を通過可能となる。

そこで、曲管を通過できるようにロボットの一部改良を行う。主な改良点を以下に示す。

(1) フレキシブルカップリングの装着

車輪走行機構とガイドユニットを連結するカップリングを曲げ剛性が小さいフレキシブルカップリングに改良する。このフレキシブルカップリングは車輪走行機構とガイドユニットを連結する部分であり、曲げ剛性のみが小さく、ねじり剛性が高いカップリング機能を有するものが必要となる。そこで、円筒部材に螺旋状のスリットを加工したものでスプリング機能とカップリング機能を同時に兼ね備えたフレキシブルカップリングを使用することにした。曲管走行時はこのカップリングが曲管の中心軸にそって弾性変形することで車輪走行機構とガイドユニットの中心軸を管軸の接線と平行になるように保ちながら曲管を通過させる。図4.1に設計した曲管対応管内移動ロボットの構造を示す。

フレキシブルカップリングの仕様は、湾曲可能部分の長さが60mmで先端に1Nの荷重が作用したときの湾曲角度が60°とした。そして、設計したフレキシブルカップリングは曲げ剛性0.08Nm/radである。

(2) ガイドユニットのアーム角度の規制

図4.1に示すようにガイドユニットはアーム先端に取り付けたボールベアリングをねじりコイルばねによって管壁に押付ける構造となっている。これまでこのアームはコイルば

ねの回転中心に回転できる構造であり、ガイドユニットの中心軸とアームのなす角度が 90° を超えてしまうことがあった。そこで、アームの角度が常時 90° 以下になるようにガイドユニットの先端側にアームの角度を規制するリングを取り付け、ガイドユニットの各アームの姿勢が均一になるようにした。

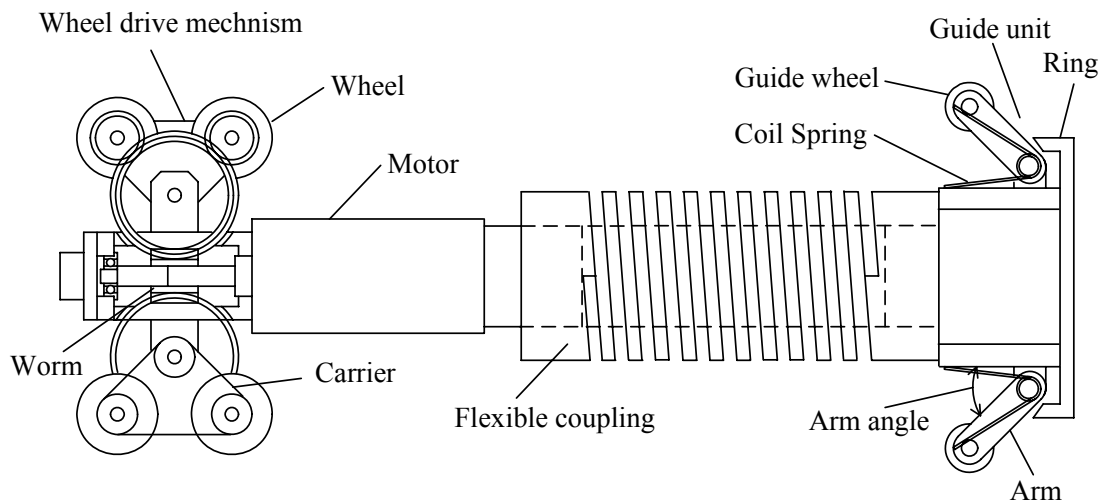


Fig.4.1 Structure of the in-pipe mobile robot for bent pipes

4.3 曲管走行時の力学解析

曲管内を走行する管内移動ロボットの解析モデルを図 4.2 に示す。ロボットは曲管の曲がりの内側と外側それぞれの管壁に車輪が接触して管壁との摩擦駆動力で曲管内を走行する平面モデルとする。曲管走行では、曲がりの内側と外側で車輪の経路長さに差が生じるために、車輪は差動すべりを起こすことになり、車輪は回転しながらすべりを起こして運動していることになる。管の内半径を R_p 、曲管の管の中心軸における曲率半径を ρ_B 、車輪の半径を r_W とする。

管内移動ロボットの進行方向に対して曲管の曲率半径の大きい側と小さい側の車輪をそれぞれ車輪#1, 車輪#2 とし、それぞれの車輪の回転速度は等しく ω_W とすると、車輪#1, #2 の車軸の移動速度 v_{W1} , v_{W2} は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} v_{W1} &= r_W \omega_W + v_0 \\ v_{W2} &= r_W \omega_W - v_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

ここで、 v_0 はすべりによる車輪の速度であり、それぞれの車輪の v_0 の絶対値は等しいとする。管内移動ロボットが曲管内を走行している場合、ロボットの角速度を $\dot{\theta}_B$ 、ロボットの速度を v_R とすると、ロボットの速度 v_R は次式となる。

$$v_R = \rho_B \dot{\theta}_B \quad (4.2)$$

そして、曲管を走行しているそれぞれの車輪の軸の速度は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} v_{W1} &= (\rho_B + R_p) \dot{\theta}_B = v_R \frac{\rho_B + R_p}{\rho_B} \\ v_{W2} &= (\rho_B - R_p) \dot{\theta}_B = v_R \frac{\rho_B - R_p}{\rho_B} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

式(4.1)～式(4.3)より、ロボットの速度 v_R は次式に書き換えられる。

$$v_R = \frac{v_{W1} + v_{W2}}{2} = r_W \omega_W \quad (4.4)$$

曲管内を走行する管内移動ロボットの曲がり外側の車輪の力学解析モデルを図 4.3 に示す。解析モデルは第 3 章の 3.2 節の直管走行時の力学解析のモデルと同じ平面モデルとした。点 B, G, C, W はそれぞれ、本体と遊星歯車支持部の固定点、遊星歯車の回転中心、キャリアの重心、車輪の回転中心である。駆動するためのトルクは太陽歯車に与えそのトルクを τ_G とし、車輪の駆動トルクと太陽歯車、車輪それぞれの角速度を τ_W , ω_G , ω_W とする。本体に負荷 L が作用した状態で走行しているときの車輪に作用する力についても同様に定義し、 P_x , P_y は車輪と管壁の接触点に作用する力の x , y 成分とする。

車輪走行機構の車輪が回転しながらスリップして移動する場合の車輪#1 の回転中心 W 点まわりの運動方程式は次式となる。

$$I_W \ddot{\theta}_W = -\tau_W + r_W (P_x + f_K) \quad (4.5)$$

$$f_K = \mu_K P_y \quad (4.6)$$

ここで、 f_k は車輪と管壁との動摩擦力、 μ_k は車輪と管壁間の動摩擦係数である。 f_k は車輪と管壁の接触点に作用している車輪を回転させるためのグリップ力 P_x とは異なるものである。車輪は等速回転しているのでその条件は $\dot{\theta}_w = 0$ となり、式(4.5)は次式となる。

$$\tau_w = r_w(P_x + f_k) \quad (4.7)$$

ただし、今回はフレキシブルカップリングの曲げモーメントによる車輪の押付け力は本車輪走行機構で得られる押付け力 P_y に比べて小さいことから無視できると仮定する。次に、車輪の動力収支を考える。回転しながらスリップしている場合の車輪の移動速度は式(4.1)から得られ、車輪のする仕事は負荷 L を用いて表すと次式となる。

$$\tau_w \omega_w = Lv_{w1} \quad (4.8)$$

式(4.8)に式(4.3)、(4.4)を代入すると次式となる。

$$\tau_w \omega_w = Lr_w \omega_w \frac{\rho_B + R_P}{\rho_B} \quad (4.9)$$

式(4.9)から車輪駆動トルクは次式から得られる。

$$\tau_w = Lr_w \frac{\rho_B + R_P}{\rho_B} \quad (4.10)$$

管壁からの作用力 P_x は第3章の解析の式(3.17)より負荷 L と同値であり、式(4.7)は次式のよう書き換えられる。

$$\tau_w = r_w(L + f_k) \quad (4.11)$$

車輪駆動トルク τ_w は式(4.9)、(4.10)のいずれかの式で与えられ、動摩擦係数 μ_k は次式から得られる。

$$\mu_k = \frac{L}{P_y} \left(\frac{\rho_B + R_P}{\rho_B} - 1 \right) \quad (4.12)$$

最後に、式(4.10)で得られる曲管走行時の車輪駆動トルクを直管走行時の車輪駆動トルクと比較する。直管走行時の車輪駆動トルクは第3章の式(3.21)から得られ、直管走行時の車輪駆動トルクを $\tau_{w,S}$ とすると、曲管走行時の車輪駆動トルク τ_w と直管走行時の車輪駆動トルク $\tau_{w,S}$ には次式の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \frac{\tau_w}{\tau_{w,S}} &= Lr_w \frac{\rho_B + R_P}{\rho_B} \frac{1}{Lr_w} = \frac{\rho_B + R_P}{\rho_B} \\ \tau_w &= \tau_{w,S} \frac{\rho_B + R_P}{\rho_B} = \tau_{w,S} K_B \\ K_B &\equiv \frac{\rho_B + R_P}{\rho_B} \end{aligned} \quad (4.13)$$

ここで、 K_B は曲管の曲率半径と管内半径から決まる定数である。式(4.13)から曲管走行時の車輪駆動トルクは直管走行時の車輪駆動トルクに定数 K_B を乗じることで計算できる。

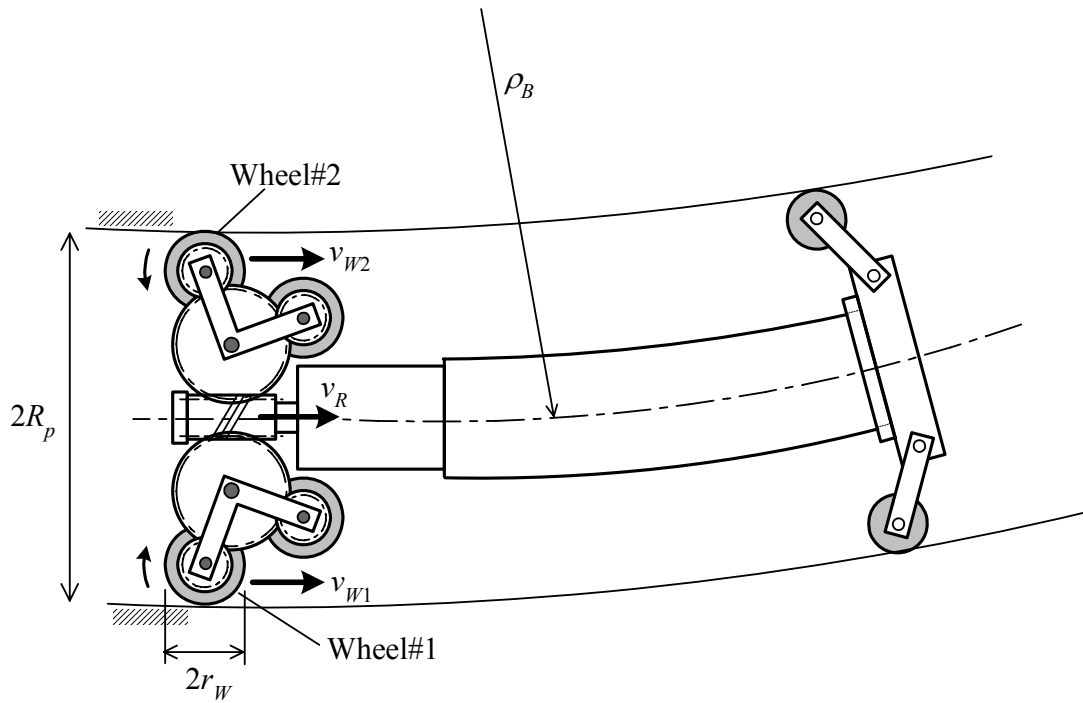


Fig. 4.2 Static analysis model of the mobile robot for bent pipes

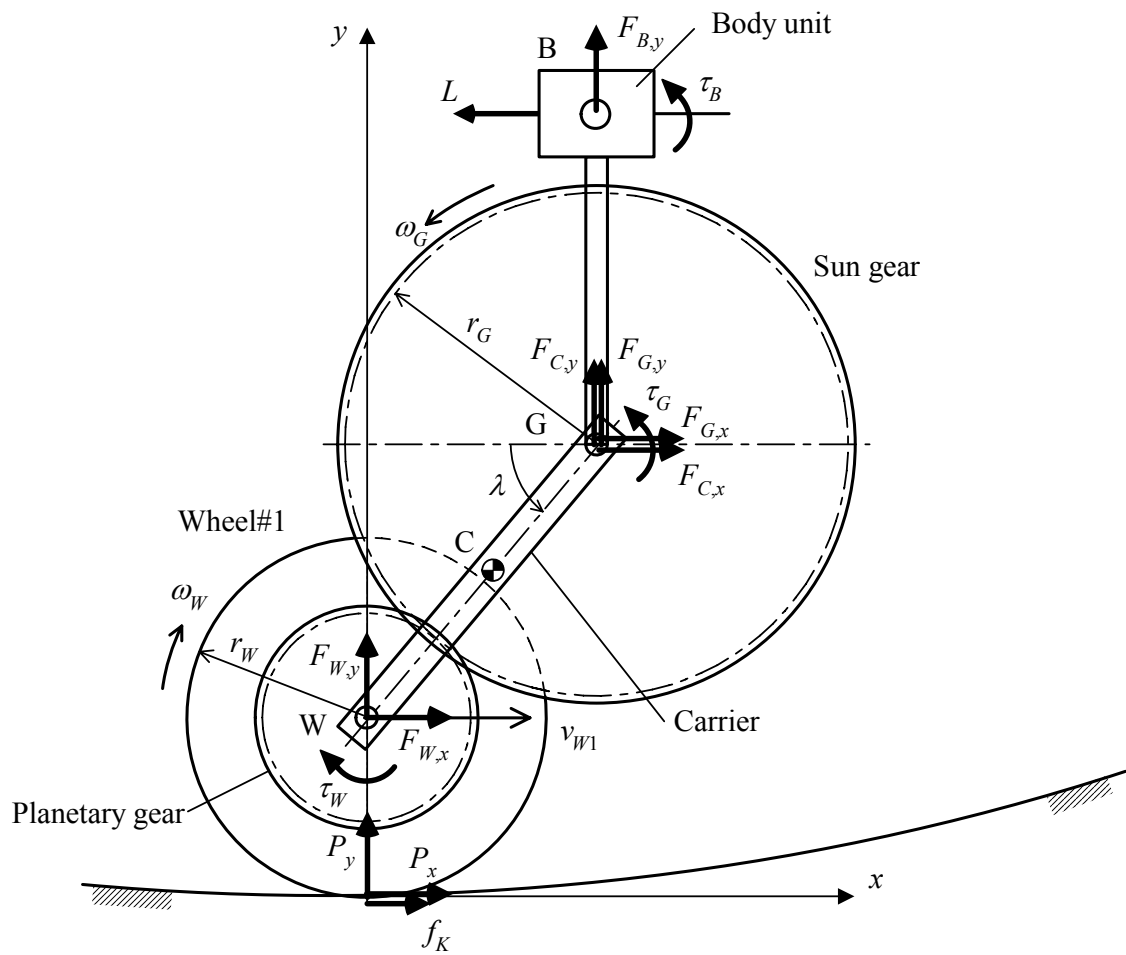


Fig. 4.3 Static analysis model of the wheel drive mechanism for bent pipes

4.4 曲管走行実験および考察

4.4.1 曲管対応試作機

曲管走行の実験に用いた曲管対応ロボットの概略断面図は図 4.1 のとおりである。ロボットの寸法と質量は、外径 45mm、長さ 145mm、質量 150g である。フレキシブルカップリングに接続させる車輪走行機構とガイドユニットは第 3 章の 3.4.1 項で示したものと同一のものを使用した。フレキシブルカップリングは外径 25mm、全長 74mm、螺旋状スリット部分の長さ 54mm で、質量 43g のアルミ製で、前述した曲げ剛性 0.08Nm/rad を有するものを設計製作しそれを使用した。サーボモータに供給するケーブルはサーボモータの外周部に固定させて、外部に設けた制御回路に接続した。図 4.4 に曲管走行の実験に用いた曲管対応ロボットの外観を示す。

4.4.2 曲管走行実験

曲管走行時の走行性能を評価するための実験装置を図 4.5 に示す。ロボットには一定負荷を与え、曲管内を走行させた。ロボットの移動速度および移動距離はワイヤとプリーを用いて計測用エンコーダで計測した。モータの角速度はモータ内蔵のエンコーダ、モータの駆動トルクはモータ電流からそれぞれ計測し、データの全ては PC に保存し処理した。モータの制御は 3.4 節の直管走行実験と同じとした。

管内移動ロボットには図 4.5 に示すように、円弧状アームを介して負荷がロボットの進行方向と逆方向に作用する構成にした。ロボットは曲管の曲率中心にした円弧状を移動するので、円弧状アームは曲管の曲率中心で回転するように支持する。そして、この円弧状アームには半径 R_D の負荷用プリーを取り付け、この負荷プリーを用いてロボットに負荷を与える。円弧状アームとロボットの後端部はワイヤを用いて接続させた。負荷用プリーには負荷となるトルクが作用するようにワイヤと重りを用いて一定負荷を与える。そして、負荷を与えるワイヤの途中に計測用プリーを介してエンコーダを取り付け、ロボットの移動位置、移動速度を計測した。

曲管には管内径 48.5mm、管軸中心での曲率半径 181.5mm の透明アクリル管を用いた。図 4.6 に負荷用プリーと円弧状アームを取り付けた実験装置の外観を示す。また、図 4.7 に曲管路内を走行している管内移動ロボットの外観を示す。今回の実験に用いた負荷用プリーの外径は 45mm であることから、管内移動ロボットへの負荷 L と重り W (N) の関係は次式となる。

$$L = \frac{181.5}{45} W = 0.248 \cdot W \quad (4.14)$$

曲管走行実験での目標移動距離は 120mm、車輪半径は $r_W=4.7\text{mm}$ とした。図 4.8 に負荷 L に対する管内移動ロボットの移動速度の関係を示す。図中には比較のために直管走行時の結果もあわせてプロットしている。図 4.8 中の破線は実験で得たモータ角速度と式(4.4)から算出した管内移動ロボットの移動速度である。曲管走行の移動速度は直管走行時との差がほとんどないことが確認できた。

図 4.9 に負荷 L に対するモータトルク τ_M の関係を示す。図中には比較のために直管走行時の結果もあわせてプロットしている。フレキシブルカップリングを用いたロボットの直管走行特性は第 3 章の図 3.11 の実験結果と同じ結果となり、フレキシブルカップリングを用いた場合でもロボットの直管走行時の特性に影響しないことが確認できた。図 4.9 の負荷 L と

モータトルク τ_M の実験結果から最小自乗法による直線回帰を行って切片を求めた。その結果、曲管の場合が 55.5mNm, 直管の場合が 48.1mNm となり、この値を無負荷時のモータトルク $\tau_{M,0}$ とした。モータトルク τ_M と車輪トルク τ_W は式(2.2)より次式の関係がある。

$$\tau_W = \frac{\eta_G \eta_P}{u_G u_P} \tau_M \quad (4.15)$$

ここで、 η_G , η_P , u_G , u_P はそれぞれウォームとかみあう太陽歯車間の伝達効率、太陽歯車と遊星歯車間の伝達効率、ウォームと太陽歯車間の速比、太陽歯車と遊星歯車間の速比である。歯車列の伝達効率は第3章で扱った値、 $\eta_G = 0.2$, $\eta_P = 0.95$ とする。図 4.9 の実験結果からモータトルクを($\tau_M - \tau_{M,0}$)として式(4.15)より車輪の駆動トルクは求められ、図 4.10 にその結果を示す。曲管走行および直管走行の実験結果はそれぞれ式(4.10), 式(3.21)より求めた理論値と良く一致しており、解析式の妥当性が確認できた。また、フレキシブルカップリングの曲げ剛性が小さい場合には走行特性に影響しないことがわかった。図 4.10 の曲管走行時の負荷が大きい場合、実験結果と計算結果の差が大きくなっているが、これは負荷をロボットの中心軸に対して平行に与えられなかったためであると考えられる。



Fig.4.4 Photograph of the in-pipe mobile robot for bent pipes

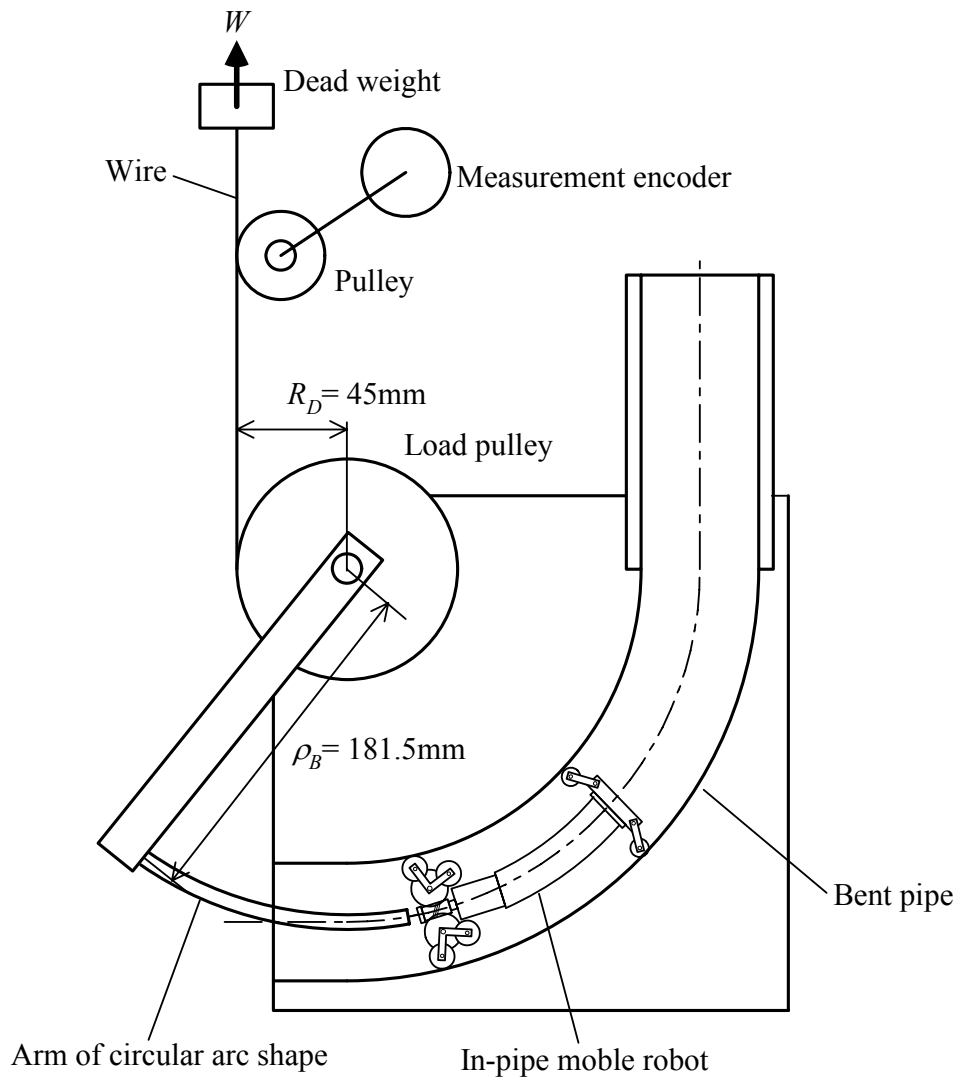


Fig.4.5 Experimental apparatus of the in-pipe mobile robot for bent pipes

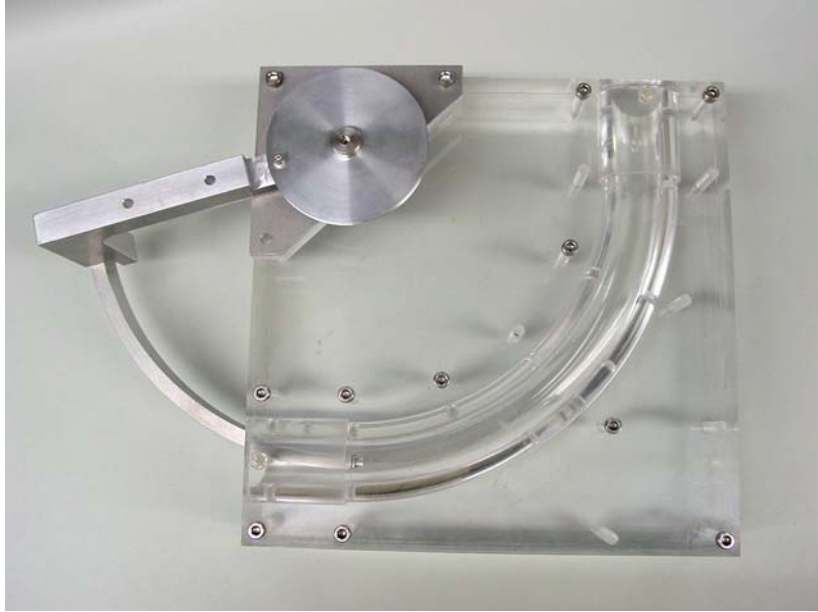


Fig.4.6 Photograph of the bent pipe

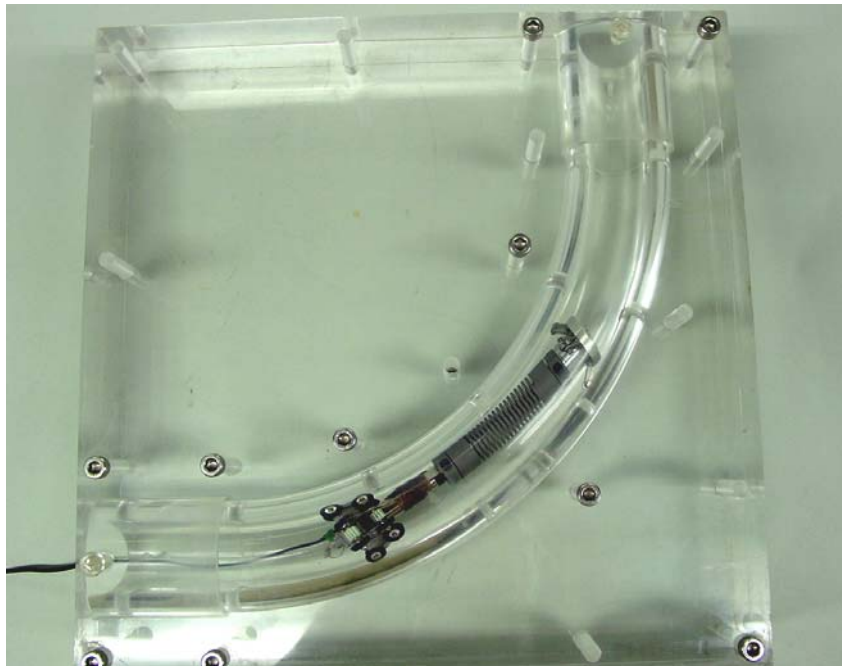


Fig.4.7 Photograph of the in-pipe mobile robot through bent pipe

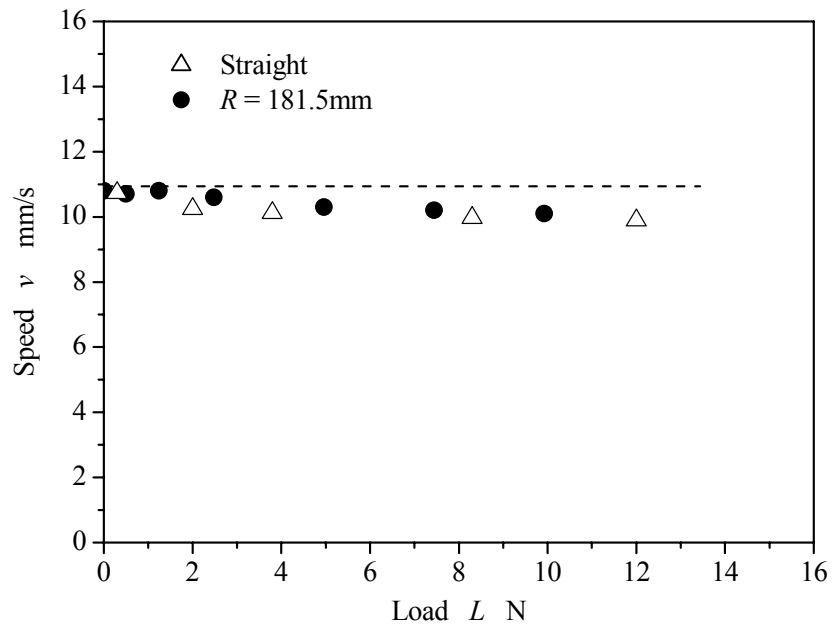


Fig. 4.8 Relation between load and speed of mobile robot for bent pipes

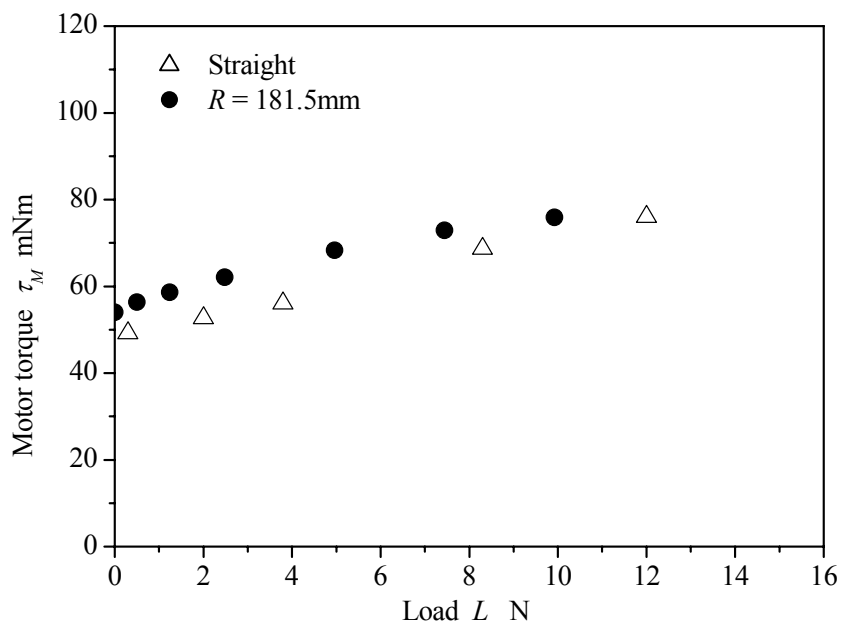


Fig. 4.9 Relation between load and motor torque of mobile robot for bent pipes

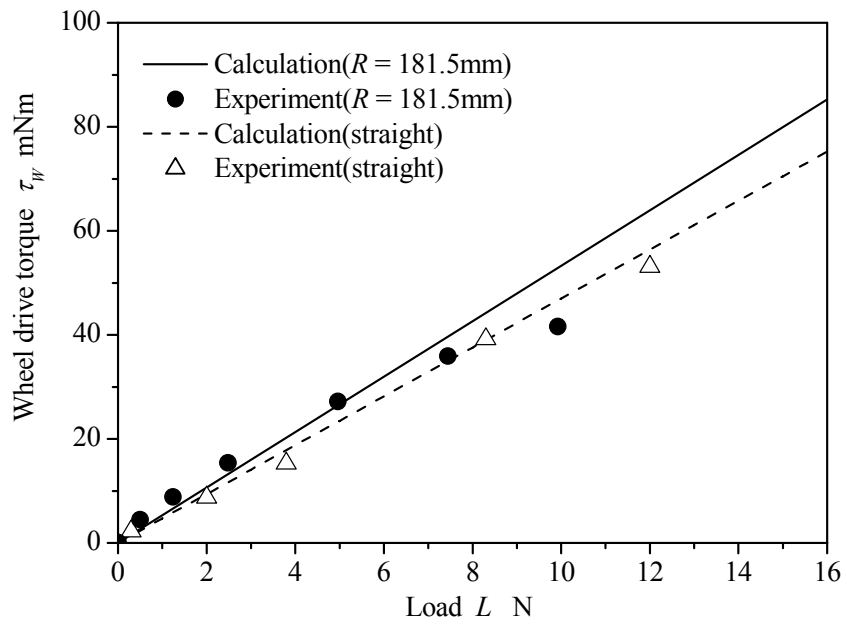


Fig. 4.10 Relation between load and wheel drive torque of mobile robot for bent pipes

4.5 まとめ

遊星歯車式管径追従車輪走行機構を利用した小口径内移動ロボットの走行特性を明らかにするために曲管走行時の運動特性ならびに力学特性に関して、理論解析と実験検証を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 曲管走行時の車輪駆動トルクは直管走行時の車輪駆動トルクに曲管の曲率半径と管内半径から決まる定数を乗じることで求めることができる。
- (2) コイルばね構造のフレキシブルカップリングを用いて試作した外径 45mm、長さ 145mm の曲管対応管内移動ロボットを用いて、管軸中心の曲率半径 181.5mm の屈曲管内の走行実験を行った結果、上記(1)の理論解析は実験結果と良く一致することが確認できた。
- (3) 管軸中心の曲率半径 181.5mm の屈曲管の走行実験において、試作ロボットの移動速度は 10mm/s で直管走行時との差がほとんどないことを確認した。

第5章 段差通過時の力学解析

5.1 はじめに

管内移動ロボットの実用化にはさまざまな形状の管内を安定して走行できることが必須であることから、第3章では直管走行時、第4章では曲管走行時の力学特性を明らかにしてきた。本章では、遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた管内移動ロボットの走行時の力学特性を明らかにするための第三段階として、配管の継手部に存在する段差部の乗り越えについて検討する。原子力施設の配管は溶接継手でありその継手部には凸部の段差が存在する。この溶接継手の段差を乗り越えることが管内移動ロボットには要求され、その段差を乗り越えるためのアクチュエータを新たに搭載せずに、ロボットの前進・後退のみの動作で乗り越えられることがロボットの小型軽量化に必要となる。また、車輪走行機構を用いた管内移動ロボットの段差通過の実現した例は少ない。そこで本章では、遊星歯車式管径追従車輪走行機構の段差通過時の力学特性を理論および実験よりを明らかにする。

まず5.2節では、車輪を剛体とみなして車輪の段差の角部まわりの回転運動を考慮した解析モデルに連立微分方程式の数値解法により順動力学解析を行う手法⁽⁵⁷⁾を適用して解析を行い、実験と比較して段差通過が可能となる車輪走行機構の幾何学的条件を明らかにする⁽⁵⁸⁾。次に5.3節では、車輪の弾性変形を考慮した力学解析を検討する。そして5.4節において、試作機を用いて行った実験結果と解析結果を比較検討し、最後に5.5節において段差通過を考慮したロボット機構の設計指針を述べる。

5.2 車輪を剛体とした場合の解析

管内壁に凸状の段差（障害物）が存在する場合の車輪走行機構の段差走行の過程を図5.1に示す。図5.1(a)が大径管内を走行している状態、図5.1(b)が段差と接触した直後の状態、図5.1(c)が段差との接触点を支点に車輪が回転し、それに伴いキャリアが管軸側に回転し段差を半分乗り越えた状態、図5.1(d)が段差を完全に乗り越えて小径管内を走行し始める状態を示す。管壁に接触している車輪の回転に伴う前進・後退のみの動作により段差通過が可能な機構である。

車輪が段差に接触して段差を乗り越えるまでの車輪走行機構の力学解析モデルを図5.2に示す。車輪走行機構は管軸に対して対称であるので、車輪走行機構の本体部の中心が管軸を移動する車輪列が1つの平面モデルとする。車輪と段差部が接触する点Oを原点とする座標系を定義する。車輪は剛体として扱い、点Oを支点に回転するものとする。点Bは本体の中心軸と太陽歯車の支持部材との交点、G、Wは太陽歯車、車輪、それぞれの回転軸である。Cはキャリアの重心である。これらの点の座標はそれぞれ (x_B, y_B) 、 (x_G, y_G) 、 (x_C, y_C) 、 (x_W, y_W) とする。λ、lはキャリアの角度と長さ、 r_W 、 r_G 、 r_P はそれぞれ車輪の半径、太陽歯車のピッチ円半径、遊星歯車のピッチ円半径である。駆動するためのトルクは太陽歯車に本体から作用するトルクで τ_G とし、太陽歯車、車輪それぞれの角速度を ω_G 、 ω_W とする。本体に負荷Lが作用した状態で車輪が段差を乗り越える過程での機構に作用する力は図5.2に示すように定義する。 P_x 、 P_y は点Oにおける車輪に作用する力のx、y成分、 $F_{W,x}$ 、 $F_{W,y}$ は点Wにおける車輪に作用する力のx、y成分、 $F_{C,x}$ 、 $F_{C,y}$ は点Gにおけるキャリアと太陽歯車の間のキャリアに作用する力のx、y成分、 $F_{G,x}$ 、 $F_{G,y}$ は点Gにおける太陽歯車と本体の間の

太陽歯車に作用する力の x , y 成分である。本体の点 B は管軸を走行する仮定から、本体には対称の位置に配置された車輪列から力とモーメントを受け、その力とモーメントに釣りあうような力とモーメントが作用する。本体に作用する力とモーメントをそれぞれ $F_{B,y}$, τ_B とする。歯車間の太陽歯車に作用するピッチ円接線方向力を F_T 、太陽歯車に作用する半径方向力を $F_T \tan \alpha_g$ とし、 α_g は歯車の基準圧力角とする。本体、太陽歯車および車輪の重心はそれぞれ点 B, G, W にあるとし、キャリアを含め質量と慣性モーメントを各々 m_B , I_B , m_G , I_G , m_W , I_W , m_C , I_C とする。太陽歯車と遊星歯車のかみあい点を T とする。

車輪走行機構が段差 H を乗り越える過程の本体、太陽歯車、キャリアおよび車輪の並進および回転の運動方程式は次式となる。

$$m_B \ddot{x}_B = -F_{G,x} - F_{C,x} - L \quad (5.1)$$

$$m_B \ddot{y}_B = F_{B,y} - F_{G,y} - F_{C,y} \quad (5.2)$$

$$I_B \ddot{\theta}_B = \tau_B - \tau_G + b(-F_{G,x} - F_{C,x}) + a(-F_{G,y} - F_{C,y}) \quad (5.3)$$

$$m_C \ddot{x}_C = F_{C,x} - F_{W,x} \quad (5.4)$$

$$m_C \ddot{y}_C = F_{C,y} - F_{W,y} \quad (5.5)$$

$$I_C \ddot{\lambda} = l_h F_{C,y} C_\lambda - l_h F_{C,x} S_\lambda + l_h F_{W,y} C_\lambda - l_h F_{W,x} S_\lambda \quad (5.6)$$

$$m_G \ddot{x}_G = F_{G,x} - F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) \quad (5.7)$$

$$m_G \ddot{y}_G = F_{G,y} + F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g) \quad (5.8)$$

$$I_G \ddot{\theta}_G = \tau_G - F_T r_G \quad (5.9)$$

$$m_W \ddot{x}_W = F_{W,x} + F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) + P_x \quad (5.10)$$

$$m_W \ddot{y}_W = F_{W,y} - F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g) + P_y \quad (5.11)$$

$$I_W \ddot{\theta}_W = -F_T r_p + y_W P_x - x_W P_y \quad (5.12)$$

ただし、 $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\theta}$ はそれぞれの添え字に対応する運動物体の x , y 方向の加速度と重心まわりの角加速度である。 $\ddot{\lambda}$ はキャリアの点 G まわりの角加速度、 $S_\lambda, C_\lambda, l_h$ はそれぞれ $S_\lambda = \sin \lambda$, $C_\lambda = \cos \lambda$, $l_h = l/2$ である。また、 a, b は点 B, G 間の x, y 方向の距離である。キャリアの角度は $\lambda = \sin^{-1}[(R - b - H - r_w \sin \alpha)/l]$ である。

車輪の点 O まわりの回転角を x 軸と線分 OW のなす角度 α で表すと、運動物体の x, y 方向の加速度と重心まわりの角加速度は次式となる。

$$\ddot{\theta}_W = \ddot{\alpha} = -u_p \ddot{\theta}_G + (1 + u_p) \ddot{\lambda} \quad (5.13)$$

$$\ddot{\lambda} = -\frac{r_W}{lC_\lambda} \left(\frac{\dot{\lambda}S_\lambda}{C_\lambda} \dot{\alpha} \cos \alpha + \ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha \right) \quad (5.14)$$

$$\ddot{x}_W = -r_W (\ddot{\alpha} \sin \alpha + \dot{\alpha}^2 \cos \alpha) \quad (5.15)$$

$$\ddot{y}_W = r_W (\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha) \quad (5.16)$$

$$\ddot{x}_G = \ddot{x}_W - l(\ddot{\lambda}S_\lambda + \dot{\lambda}^2 C_\lambda) \quad (5.17)$$

$$\ddot{y}_G = \ddot{y}_W + l(\ddot{\lambda}C_\lambda - \dot{\lambda}^2 S_\lambda) \quad (5.18)$$

$$\ddot{\theta}_G = [(1+u_P)\ddot{\lambda} - \ddot{\alpha}]/u_P \quad (5.19)$$

$$\ddot{x}_C = (\ddot{x}_G + \ddot{x}_W)/2 \quad (5.20)$$

$$\ddot{y}_C = (\ddot{y}_G + \ddot{y}_W)/2 \quad (5.21)$$

$$\ddot{x}_B = \ddot{x}_G \quad (5.22)$$

$$\ddot{y}_B = 0 \quad (5.23)$$

式(5.14)～式(5.21)を車輪の入力角加速度である $\ddot{\alpha}$ で整理すると次式が得られる.

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\lambda} &= A_{11}\ddot{\alpha} + A_{12} \\ \ddot{x}_W &= A_{13}\ddot{\alpha} + A_{14} \\ \ddot{y}_W &= A_{15}\ddot{\alpha} + A_{16} \\ \ddot{x}_G &= A_{31}\ddot{\alpha} + A_{32} \\ \ddot{y}_G &= A_{33}\ddot{\alpha} + A_{34} \\ \ddot{\theta}_G &= A_{35}\ddot{\alpha} + A_{36} \\ \ddot{x}_C &= A_{37}\ddot{\alpha} + A_{38} \\ \ddot{y}_C &= A_{39}\ddot{\alpha} + A_{40} \end{aligned} \right\} \quad (5.24)$$

ただし、式(5.24)の各係数 A_{ij} は α 、 $\dot{\alpha}$ の関数であり、付録Dに記載する. 式(5.1)～式(5.12)に式(5.24)を代入し、機構の条件 $\ddot{y}_B = \ddot{\theta}_B = 0$ を与えて整理すると次式が得られる.

$$\begin{bmatrix}
m_B A_{31} & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -b & -a & -b & -a & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
m_C A_{37} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
m_C A_{39} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
I_C A_{11} & 0 & 0 & l_h S_\lambda & -l_h C_\lambda & 0 & 0 & l_h S_\lambda & -l_h C_\lambda & 0 & 0 & 0 \\
m_G A_{31} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g & 0 & 0 \\
m_G A_{33} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_\lambda - S_\lambda \tan \alpha_g & 0 & 0 \\
I_G A_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_G & 0 & 0 \\
m_W A_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -S_\lambda + C_\lambda \tan \alpha_g & -1 & 0 \\
m_W A_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g & 0 & -1 \\
I_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_P & -y_W & x_W
\end{bmatrix}$$

$$\times \begin{pmatrix} \ddot{\alpha} \\ F_{G,x} \\ F_{G,y} \\ F_{C,x} \\ F_{C,y} \\ F_{B,y} \\ \tau_B \\ F_{W,x} \\ F_{W,y} \\ F_T \\ P_x \\ P_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -m_B A_{32} - L \\ 0 \\ \tau_G \\ -m_C A_{38} \\ -m_C A_{40} \\ -I_C A_{12} \\ -m_G A_{32} \\ -m_G A_{34} \\ -I_G A_{36} + \tau_G \\ -m_W A_{14} \\ -m_W A_{16} \\ 0 \end{pmatrix}$$

(5.25)

この機構の駆動トルク τ_G はモータの制御系から定められる。モータは付録 B に示した位置と速度の目標値をトルク指令へフィードフォワードさせる制御系⁽⁵⁶⁾を用いて駆動する。モータの速度，位置およびそれらの目標値をそれぞれ ω_M ， θ_M ， $\omega_{M,D}$ ， $\theta_{M,D}$ とし次式で与える。

$$\left. \begin{aligned}
\omega_{M,D} &= \omega_W u_G / u_P \\
\omega_M &= [(1 - u_P) \dot{\lambda} - \dot{\alpha}] u_G / u_P \\
\theta_{M,D} &= \omega_{M,D} \cdot t_i \\
\theta_M &= \theta_G u_G
\end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

モータの指令値 U_M は次式のように定義した。

$$\left.
\begin{aligned}
U_M &= K_{RV} K_{PV} \omega_{M,D} + \omega_{M,P} K_{FV} + U_I - K_{PV} \omega_M \\
\omega_{M,P} &= K_{PP} (\theta_{M,D} - \theta_M) + K_{RP} \omega_{M,D} \\
U_I &= U_I + \frac{K_{PV}}{T_I} (\omega_{M,P} - \omega_M) \Delta t
\end{aligned}
\right\} (5.27)$$

ただし、 T_I , K_{FV} , K_{PV} , K_{PP} , K_{RP} , K_{RV} は付録Bに示した制御計算に用いるゲインの値で、それぞれ速度ループ積分定数、速度ループ比例フィードバックゲイン、速度ループ比例フィードフォワードゲイン、位置ループゲイン、位置目標値フィードフォワードゲイン、位置目標値フィードバックゲインである。モータは指令電圧を電流に変換するドライバを用いてトルクを発生させているので、モータトルク τ_M は次式から得られる。

$$\tau_M = K_T \cdot K_{DR} \cdot U_M \quad (5.28)$$

ただし、 K_T はモータのトルク定数、 K_{DR} はモータドライバのゲインである。そして、ウォームと太陽歯車間の伝達効率を η_G とすると、次式のように駆動トルク τ_G が得られる。

$$\tau_G = \tau_M \cdot \eta_G \cdot u_G \quad (5.29)$$

式(5.25)は車輪の回転角加速度 $\ddot{\alpha}$ と機構の内力 $F_{G,x} \sim F_T$ および管壁からの作用力 P_x , P_y を未知数とする連立1次方程式であるが、同時に車輪の回転角 α に関する連立微分方程式である。この式から機構の内力 $F_{G,x} \sim F_T$ および管壁からの作用力 P_x , P_y を消去して α のみに関する2階微分方程式を導いて、駆動トルク τ_G を与えて解けば機構の運動が定まる。

文献(57)では、閉ループ機構の原動節角加速度と対偶作用力に関する連立1次方程式から順動力学解析を行う数値解析手法が提案されており、本機構の $\ddot{\alpha}$ と $F_{G,x} \sim P_y$ をそれぞれ文献の原動節角加速度と対偶作用力とに当てはめて適用して解くことができる。

解析は大径側の内径を49mmとし、第3章3.4節での実験に用いた管内移動ロボットの諸元を用い、車輪が段差に接触した状態から段差を乗り越える状態($\alpha = 90^\circ$)までの解析を行った。このモデルの車輪半径は $r_w = 4.7\text{mm}$ 、遊星歯車と太陽歯車間の速比は $u_p = 3$ である。図5.3に移動速度 $V = 10\text{mm/s}$ 、負荷 $L = 5\text{N}$ の場合の解析結果を示す。図5.3(a)は $H = 0.1\text{mm}$ の場合で、車輪の回転とともにキャリア角度 λ が小さくなり、車輪角度 α が 90° となり段差を乗り越えている。一方、図5.3(b)は同じ条件で $H = 0.14\text{mm}$ の場合で、時間軸を拡大して示している。キャリア角度 λ が初期値より大きくなり(記号×)乗り越えられない。解析の結果から、乗り越えられる段差の高さ H と車輪半径 r_w の関係を示すと図5.4のようになる。このモデルで乗り越えられる段差は $H = 0.13\text{mm}$ であり、車輪半径を大きくすることで乗り越えられる段差の高さは大きくなる。また、キャリア長 l を同じにして遊星歯車と太陽歯車間の速比 u_p をモデルの半分 $u_p = 1.5$ とすると乗り越えられる段差の高さは $u_p = 3$ の場合に比べて大きくなる。 $u_p = 1.5$ の場合、車輪半径 $r_w = 6.2\text{mm}$ のときにキャリア角度が $u_p = 3$ の場合と同じになり、この条件で乗り越えられる段差高さは $H = 0.26\text{mm}$ となる。

車輪が段差を乗り越える場合について車輪の点Oまわりのモーメントを考える。車輪の点Oまわりのモーメントは $F_{W,x}$, $F_{W,y}$ と F_T , $F_T \tan \alpha_g$ から計算でき、モーメントの向きは反時計回りの回転を正、時計回りの回転を負とする。図5.5に車輪半径は $r_w = 4.7\text{mm}$ 、遊星歯車と太陽歯車間の速比は $u_p = 3$ の場合の車輪の点Oまわりのモーメントの総和を示す。段差

を乗り越えた $H=0.1\text{mm}$ と $H=0.13\text{mm}$ の場合は O まわりのモーメントの総和は常に負であり車輪には時計回りのモーメントが作用している．一方に $H=0.14\text{mm}$ の場合にはモーメントの総和が常に負となっていない．

車輪が段差を乗り越える条件について検討する．解析モデルの運動物体の慣性項をすべて零と仮定して静的なつり合いから考える．車輪走行機構の本体，太陽歯車，キャリアおよび車輪の並進および回転の運動方程式において慣性項をすべて零とし車輪が等速で運動すると仮定する．この条件で式(5.1)～(5.12)式を整理すると次式が得られる．

$$\left. \begin{aligned}
 -F_{G,x} - F_{C,x} &= L \\
 -F_{G,y} - F_{C,y} + F_{B,y} &= 0 \\
 \tau_B - \tau_G - bF_{G,x} - aF_{G,y} - bF_{C,x} - aF_{C,y} &= 0 \\
 F_{C,x} - F_{W,x} &= 0 \\
 F_{C,y} - F_{W,y} &= 0 \\
 -l_h S_\lambda F_{C,x} + l_h C_\lambda F_{C,y} - l_h S_\lambda F_{W,x} + l_h C_\lambda F_{W,y} &= 0 \\
 F_{G,x} - F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) &= 0 \\
 F_{G,y} + F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g) &= 0 \\
 \tau_G - F_T r_G &= 0 \\
 F_{W,x} + F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) + P_x &= 0 \\
 F_{W,y} - F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g) + P_y &= 0 \\
 -F_T r_p + y_W P_x - x_W P_y &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (5.30)$$

そして，式(5.30)を行列形式で表すと次式となる．

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & -b & -a & -b & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_h S_\lambda & l_h C_\lambda & -l_h S_\lambda & l_h C_\lambda & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -S_\lambda + C_\lambda \tan \alpha_g & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_G & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -C_\lambda - S_\lambda \tan \alpha_g & 0 \\
 y_W & -x_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_p & 0
 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ \tau_G \\ F_{G,x} \\ F_{G,y} \\ F_{C,x} \\ F_{C,y} \\ F_{W,x} \\ F_{W,y} \\ F_{B,y} \\ F_T \\ \tau_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

式(5.31)の連立方程式を解くと次式となる.

$$\begin{aligned}
 P_x &= L \\
 F_{C,x} &= F_{W,x} \\
 F_{C,y} &= F_{W,y} \\
 F_T &= \frac{L(y_W - x_W \tan \lambda)}{x_W (S_\lambda \tan \lambda + C_\lambda) + r_P} \\
 F_{W,x} &= -F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) - L \\
 F_{W,y} &= F_{W,x} \tan \lambda \\
 P_y &= -F_{W,y} + F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g) \\
 \tau_G &= F_T r_G
 \end{aligned} \tag{5.32}$$

点 T の x 座標を x_T とすると, x_W は次式のように表される.

$$x_W = -r_P C_\lambda + x_T \tag{5.33}$$

車輪に作用する力 P_y は式(5.32), (5.33)から次式を得る.

$$P_y = \frac{L}{x_T} (r_P C_\lambda \tan \lambda + y_W) \tag{5.34}$$

車輪が段差を乗り越える力学解析において車輪には段差部から反力を受けていることが初期条件となり, 車輪と段差部における車輪に作用する力 P_y は車輪の反力として車輪側に作用していなければならない. それ以外の方向に作用している場合は初期条件と不整合を生じる. 式(5.34)および機構の条件 ($y_W > 0$) から, 車輪に作用する力 P_y が正となる条件は $x_T > 0$ の場合のみであり, $x_T < 0$, $x_T = 0$ の場合には不整合となる. $x_T > 0$ の場合は車輪に作用する力 P_y が初期条件と整合しており, 段差を乗り越えるための条件を満たしている. そして, 式(5.32)から得られる太陽歯車の駆動トルク τ_G よりも大きなトルクを作用させることで車輪は段差を乗り越えることができる. よって, 車輪走行機構の車輪が段差を乗り越えられる条件は $x_T > 0$ となり, 段差通過には太陽歯車と遊星歯車のかみあい点 T の位置が $x_T > 0$ となる条件を満たすように車輪走行機構を設計する必要がある.

図 5.4 に ■印で示す実験結果は大径側径 49mm, 小径側径 48mm の配管を用いた結果であり, $H=0.5\text{mm}$ の段差は乗り越えられている. 車輪を剛体とした解析結果は実験結果との差は大きく, これは実験に使用した車輪が弾性部材から構成されているために, 実験ではこの部材の弾性変形によって段差を乗り越えていると考えられる. よって, 解析結果を実験結果に近づけるには車輪の弾性変形を考慮した解析が必要となる.

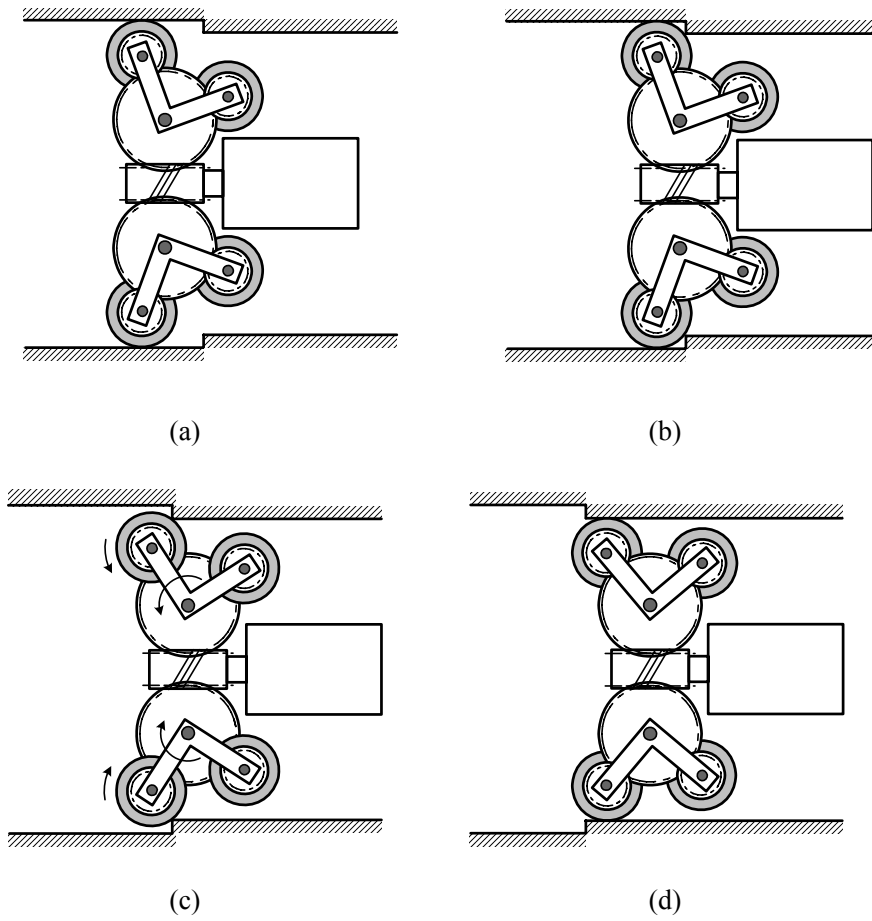
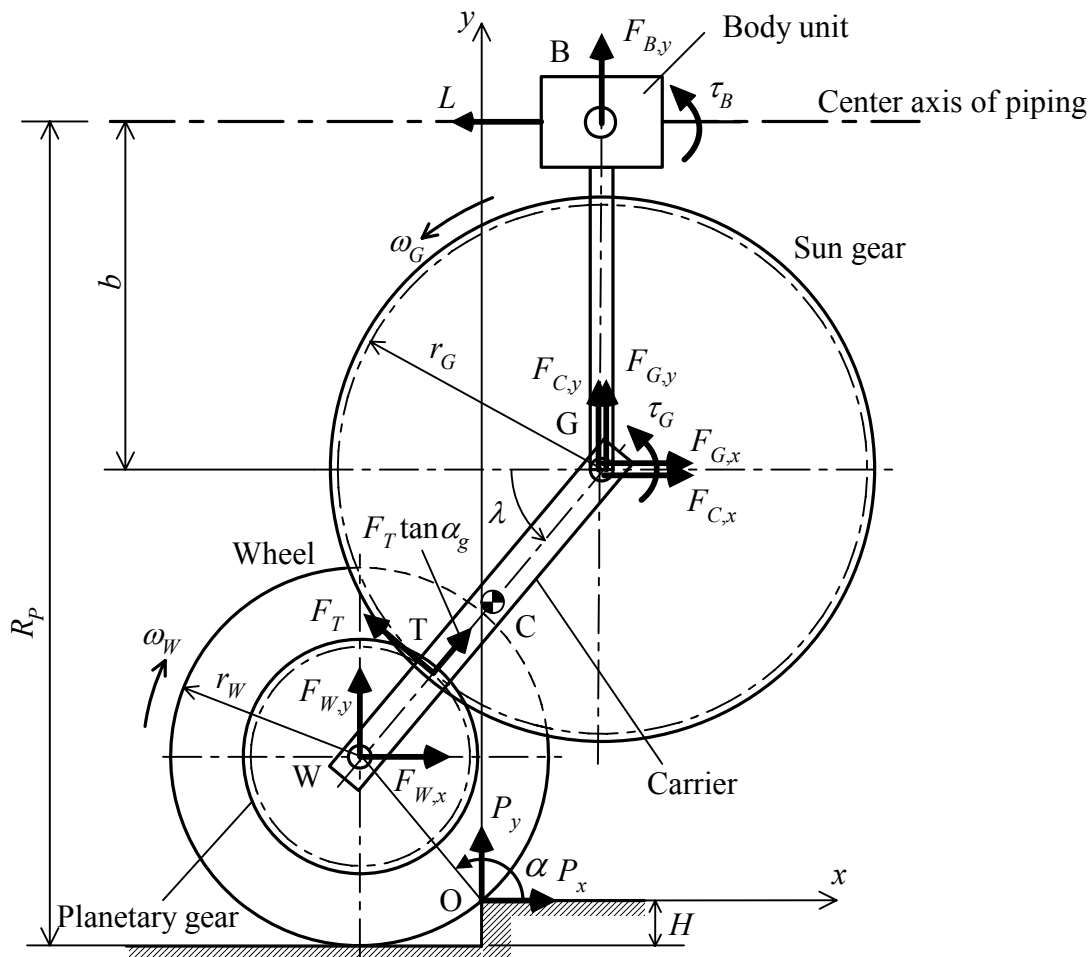
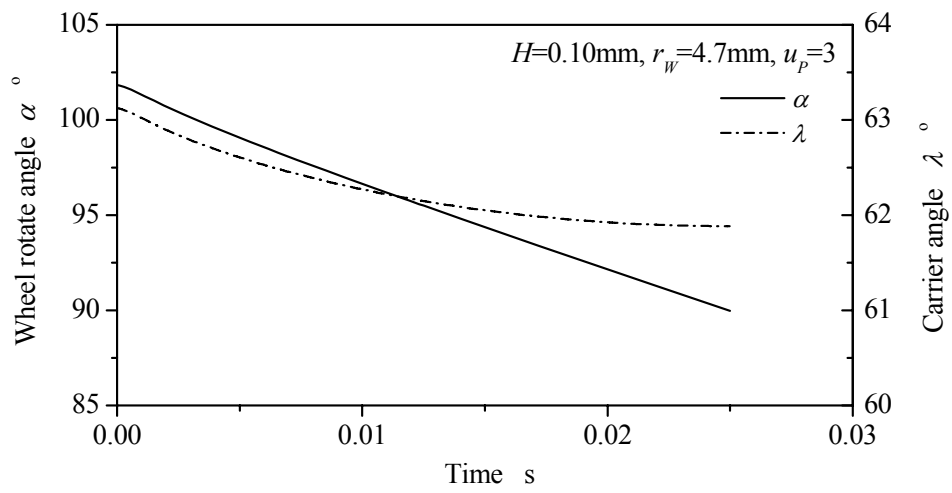


Fig.5.1 Step climbing process of the wheel drive mechanism

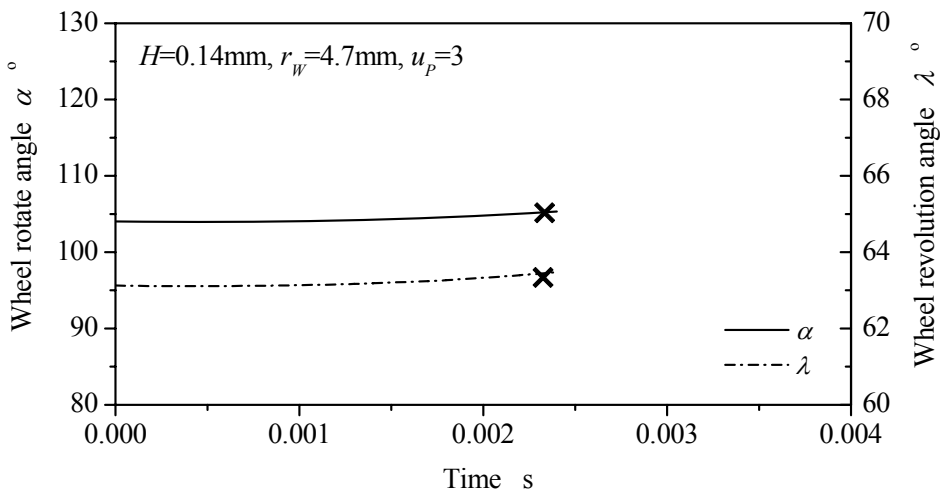


- τ_G : Torque of sun gear
- τ_B : Moment of body
- ω_G : Angular velocity of sun gear
- ω_W : Angular velocity of wheel
- λ : Wheel revolution angle

Fig.5.2 Dynamic analysis model of the wheel drive mechanism with rigid wheel when climbing step



(a) $H = 0.1\text{mm}$



(b) $H = 0.14\text{mm}$

Fig.5.3 Simulation results for wheel drive mechanism with rigid wheel when climbing step

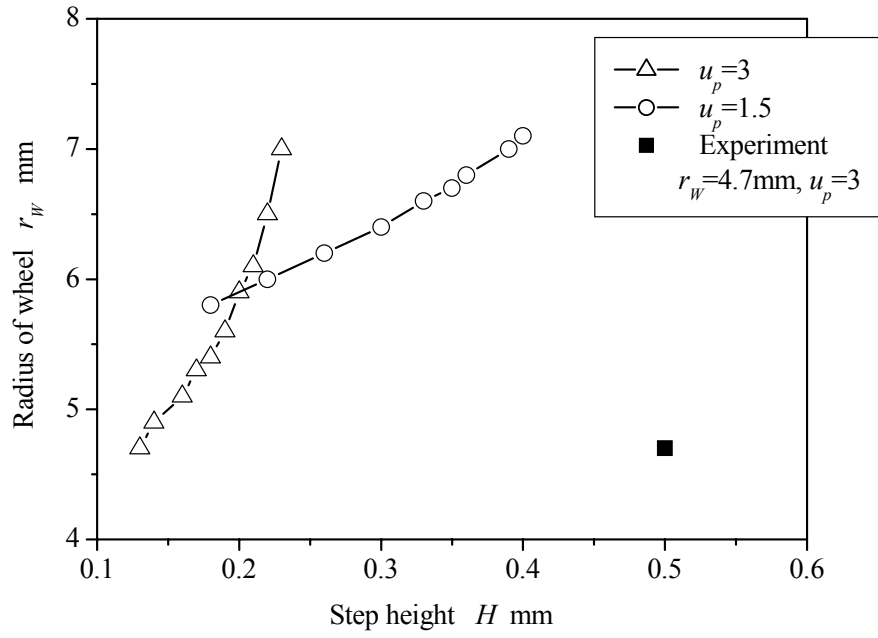
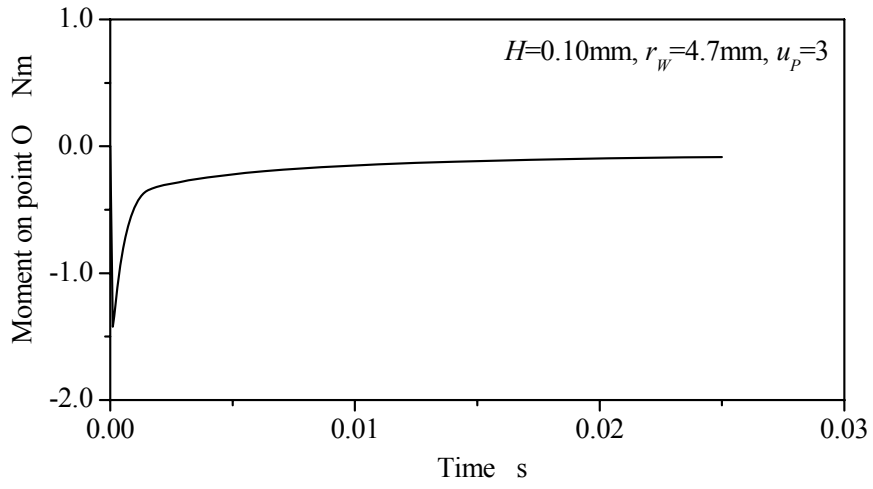
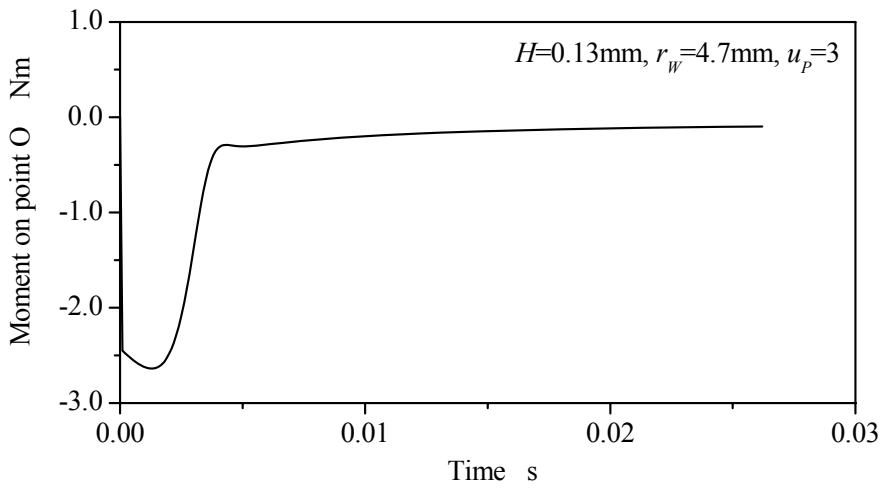


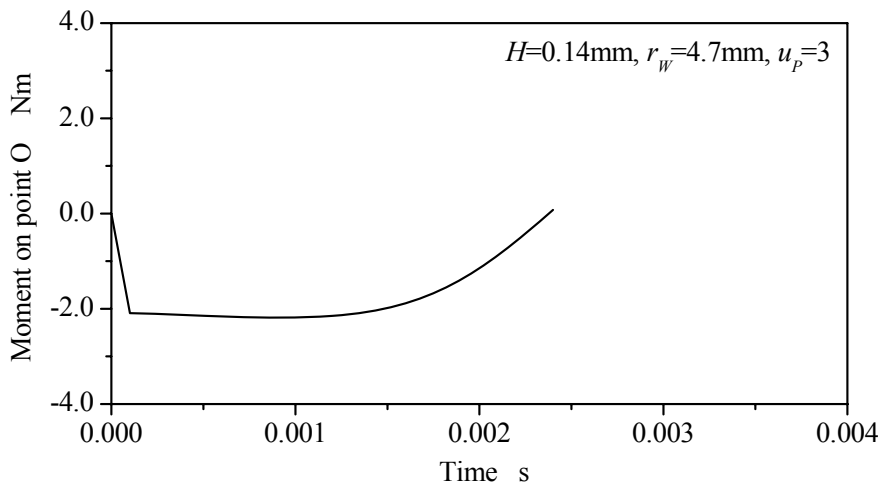
Fig.5.4 Relation between step height and radius of wheel in case of rigid wheel



(a) $H = 0.1\text{mm}$



(b) $H = 0.13\text{mm}$



(c) $H = 0.14\text{mm}$

Fig.5.5 Moment acting a wheel on point O

5.3 車輪の弾性変形を考慮した場合の解析

車輪の弾性変形を考慮した場合の解析モデルを図 5.6 に示す。車輪は外周部が弾性部材，中央部が金属製部材から構成され，弾性部材のみが弾性変形できるものとして，5.2 節と同じ手法で解析を行う。車輪の弾性変形は車輪が段差と接触する点 O の部分と管壁と接触する点 S の部分とし，それぞれ弾性変形量を Δx ， Δy ， Δy_p とする。本体，太陽歯車，キャリアの運動方程式は 5.2 節と同じ式で与えられ，弾性変形を考慮した解析モデルでの車輪の運動方程式は次式となる。

$$m_w \ddot{x}_w = F_{w,x} + F_T S_\lambda + P_x \quad (5.35)$$

$$m_w \ddot{y}_w = F_{w,y} - F_T C_\lambda + P_y + Q_y \quad (5.36)$$

$$I_w \ddot{\theta}_w = -F_T r_p + y_w P_x - x_w P_y \quad (5.37)$$

ただし，点 O に作用する力 P_x ， P_y ，点 S に作用する力 Q_y は次式のように定義する。

$$P_x = -K_x \Delta x - 2\zeta \sqrt{m_w K_x} \Delta \dot{x} \quad (5.38)$$

$$P_y = -K_y \Delta y - 2\zeta \sqrt{m_w K_y} \Delta \dot{y} \quad (5.39)$$

$$Q_y = -K_Q \Delta y_p = L [\tan \lambda + (S_\lambda \tan \lambda + C_\lambda) r_w / r_p] \quad (5.40)$$

ただし， K ， ζ は車輪弾性部材のばね剛性，減衰比， Q_y は車輪の管壁への押付け力で式(3.18)から導出した。車輪弾性部材のばね剛性 K は，弾性部材が硬質ゴム材料で，弾性変形量 1mm 以下と大きいことから比例定数とした。

車輪は図 5.7 に示すように金属製円筒部材の周囲に厚さ $(r_w - r_d)$ の弾性部材が一体化された構成とし，車輪弾性部材のばね剛性 K_x ， K_y を決めた。 K_Q は弾性部材の圧縮方向のばね剛性で，その値は実験より決めた。図 5.8 に弾性部材の圧縮方向のばね剛性の実験結果を示す。実験結果は図 5.8 に示すように円錐形状の車輪と平板によるもので，車輪の弾性変形量が小さい領域では車輪の幅方向全域で平板に接触していないことから解析では変形量が大きい範囲での結果を用い，車輪の圧縮方向のばね剛性は $K_Q = 3 \times 10^5 \text{N/m}$ とする。 K_x ， K_y は弾性部材をせん断するように力が作用し，かつ，変形量が $\Delta y \leq \varepsilon$ の場合と $\Delta y > \varepsilon$ の場合ではばね剛性が異なるものとした。これは，金属製円筒部材近傍の弾性部材は母材の影響を受けてより変形しにくい構造になるものと仮定した。車輪の回転角 α は 5.2 節と同様に定義し，弾性変形を考慮した車輪の加速度は次式より得られる。

$$\ddot{x}_w = -r_w (\ddot{\alpha} \sin \alpha + \dot{\alpha}^2 \cos \alpha) + \Delta \ddot{x} \quad (5.41)$$

$$\ddot{y}_w = r_w (\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha) + \Delta \ddot{y} \quad (5.42)$$

運動物体の加速度，角速度を車輪の角加速度，加速度 $\ddot{\alpha}$ ， $\Delta \ddot{x}$ ， $\Delta \ddot{y}$ で整理すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned}
\ddot{x}_W &= B_{11}\ddot{\alpha} + B_{12}\Delta\ddot{x} + B_{13} \\
\ddot{y}_W &= B_{14}\ddot{\alpha} + B_{15}\Delta\ddot{y} + B_{16} \\
\ddot{\lambda} &= B_{21}\ddot{\alpha} + B_{22}\Delta\ddot{y} + B_{23} \\
\ddot{x}_G &= B_{41}\ddot{\alpha} + B_{12}\Delta\ddot{x} + B_{42}\Delta\ddot{y} + B_{43} \\
\ddot{y}_G &= B_{44}\ddot{\alpha} + B_{45}\Delta\ddot{y} + B_{46} \\
\ddot{\theta}_G &= B_{47}\ddot{\alpha} + B_{48}\Delta\ddot{y} + B_{49} \\
\ddot{x}_C &= B_{50}\ddot{\alpha} + B_{12}\Delta\ddot{x} + B_{51}\Delta\ddot{y} + B_{52} \\
\ddot{y}_C &= B_{53}\ddot{\alpha} + B_{54}\Delta\ddot{y} + B_{55}
\end{aligned} \right\} \quad (5.43)$$

ただし、式(5.43)の各係数 B_{ij} は付録 E に記載する。弾性変形を考慮した解析モデルでの運動物体の運動方程式に式(5.43)を代入すると、角加速度、加速度 $\ddot{\alpha}$ 、 $\Delta\ddot{x}$ 、 $\Delta\ddot{y}$ および内力を変数とする連立方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix}
m_B B_{41} & m_B B_{12} & m_B B_{42} & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -b & -a & -b & -a & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
m_C B_{50} & m_C B_{12} & m_C B_{51} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
m_C B_{53} & 0 & m_C B_{54} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
I_C B_{21} & 0 & I_C B_{22} & 0 & 0 & l_h S_\lambda & -l_h C_\lambda & 0 & 0 & l_h S_\lambda & -l_h C_\lambda & 0 \\
m_G B_{41} & m_G B_{12} & m_G B_{42} & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g \\
m_G B_{44} & 0 & m_G B_{45} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_\lambda - S_\lambda \tan \alpha_g \\
I_G B_{47} & 0 & I_G B_{48} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_G \\
m_W B_{11} & m_W B_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -S_\lambda + C_\lambda \tan \alpha_g \\
m_W B_{14} & 0 & m_W B_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g \\
I_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_p
\end{bmatrix}
\times \begin{bmatrix}
\ddot{\alpha} \\
\Delta\ddot{x} \\
\Delta\ddot{y} \\
F_{G,x} \\
F_{G,y} \\
F_{C,x} \\
F_{C,y} \\
F_{B,y} \\
\tau_B \\
F_{W,x} \\
F_{W,y} \\
F_T
\end{bmatrix}
= \begin{bmatrix}
-m_B B_{43} - L \\
0 \\
\tau_G \\
-m_C B_{52} \\
-m_C B_{55} \\
-I_C B_{23} \\
-m_G B_{43} \\
-m_G B_{46} \\
-I_G B_{49} + \tau_G \\
P_x - m_W B_{13} \\
P_y - m_W B_{16} + Q_y \\
P_x y_W - P_y x_W
\end{bmatrix} \quad (5.44)$$

駆動トルク τ_G は 5.2 節と同じモータ制御系で駆動するものとし、さらに、モータ、コントローラで定める最大トルクでモータトルク τ_M が飽和するものとした。車輪の弾性部材の係

数は, $K_x=K_y=6\times 10^4\text{N/m}$, $K_Q=3\times 10^5\text{N/m}$, $\zeta=8$, $\varepsilon=0.45\text{mm}$ として計算をした. 車輪の弾性変形量が車輪の弾性部材の領域を超えないように $\Delta y > \varepsilon$ の場合のばね剛性は $\Delta y \leq \varepsilon$ の場合の4倍の値とした. 図 5.9 に $V=10\text{mm/s}$, $L=5\text{N}$, $H=0.5\text{mm}$ の場合の解析結果を示す. 図 5.9(a) は車輪回転角 α , キャリア角度 λ の時間変化, 図 5.9(b) はモータの角速度 ω_M , モータトルク τ_M の時間変化である. キャリア角度 λ はほぼ一定値で推移しその後減少し, 車輪の回転角度 α が 90° となり段差を乗り越えている. モータ角速度 ω_M は接触後に低下し, その後徐々に上昇する. モータトルク τ_M は接触後から徐々に上昇し乗り越えてゆく過程でピーク値を示す. 図 5.10 に $V=7.6\text{mm/s}$, $L=1\text{N}$, $H=0.75\text{mm}$ の場合の解析結果を示す. 段差を乗り越えてゆく過程でモータトルク τ_M が最大値に達し, その後モータの回転が停止し段差の乗り越えはできていない. 段差の乗り越えが可能な場合では太陽歯車と遊星歯車のかみあい点の位置が $x_T > 0$ となっている. これは, 車輪を剛体とした解析結果と同じ現象であり $x_T > 0$ の条件を満たすことで段差の通過が可能となる.

図 5.11 に車輪の弾性変形を考慮した場合の乗り越えられる段差の高さ H と車輪半径 r_W の関係を示す. 試作モデル $u_P=3$ での最大段差は $H=0.71\text{mm}$ であり, 5.2 節との結果に比べて大きく改善されている. よって, 車輪の弾性変形が段差通過に及ぼす影響が大きいと考えられる. $u_P=1.5$ の場合を 5.2 節と同じ車輪半径 $r_W=6.2\text{mm}$ の条件で比較すると最大段差は $H=0.96\text{mm}$ となる.

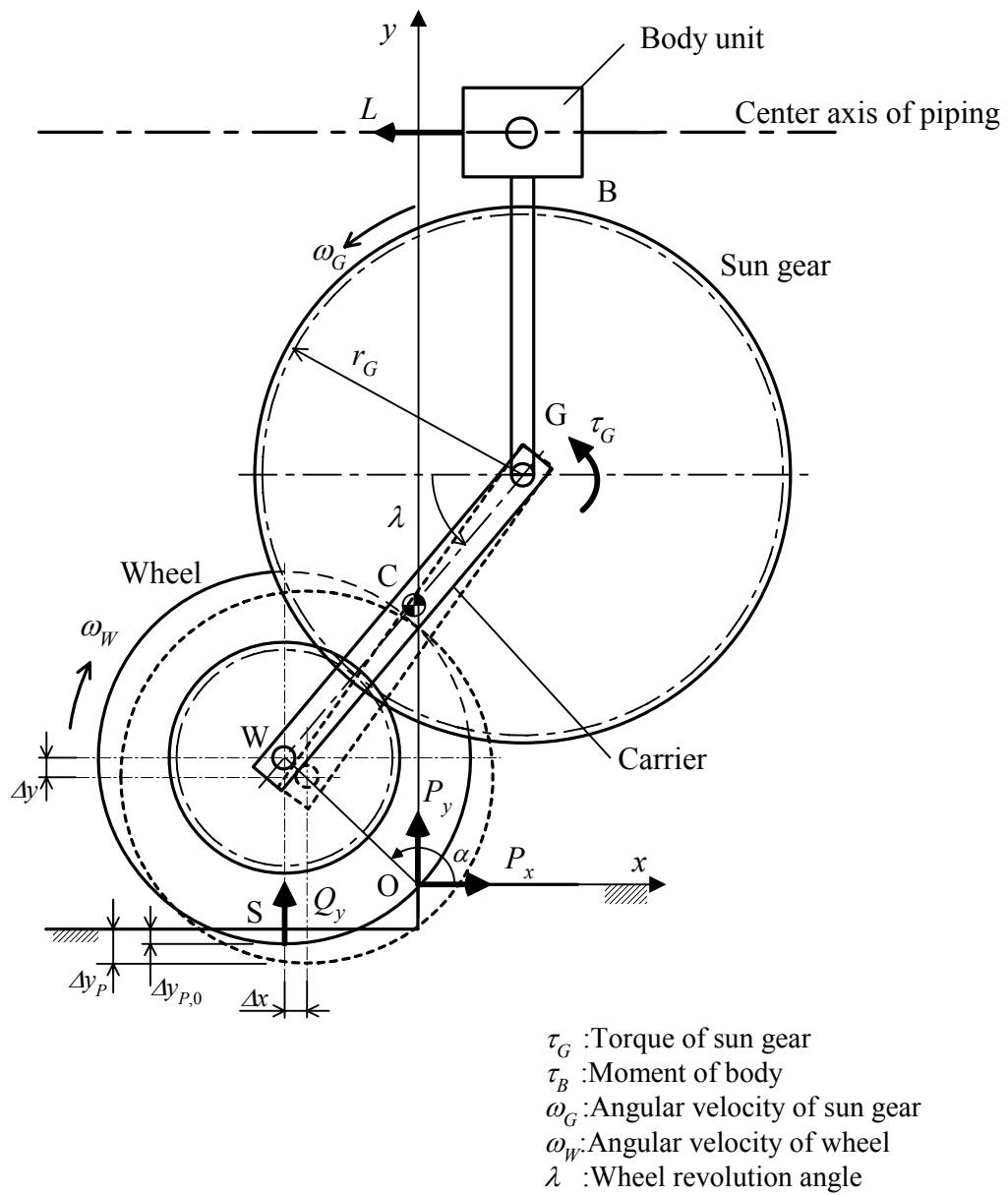


Fig.5.6 Dynamic analysis models of the wheel drive mechanism with elastic wheel

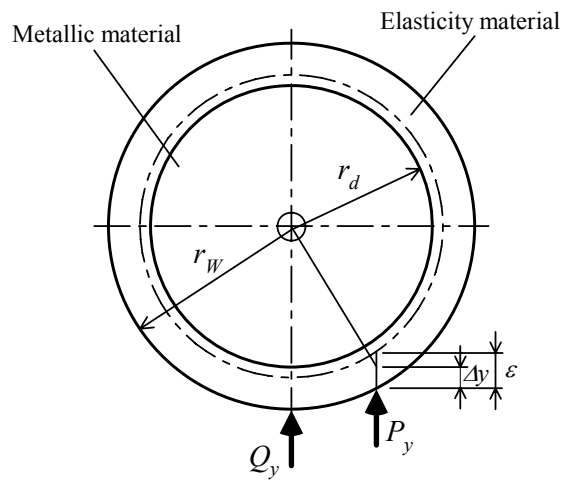


Fig.5.7 Structure of elastic wheel

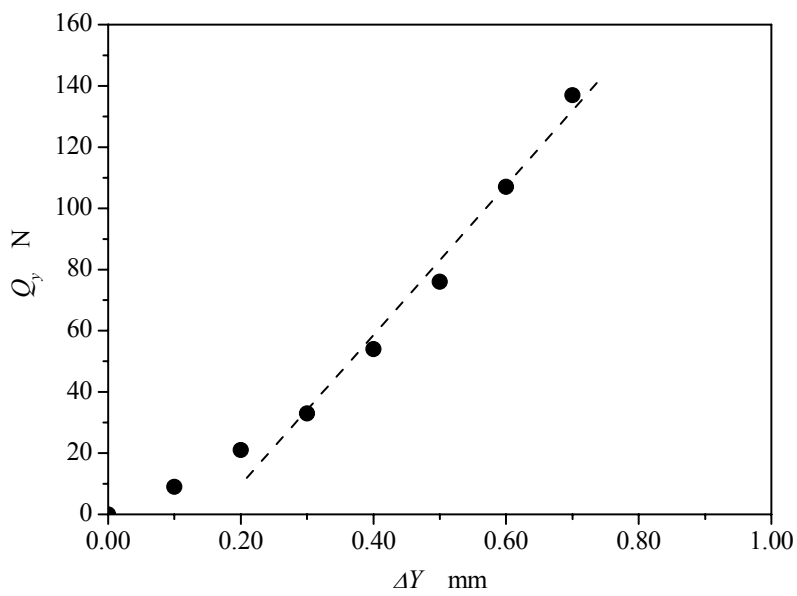
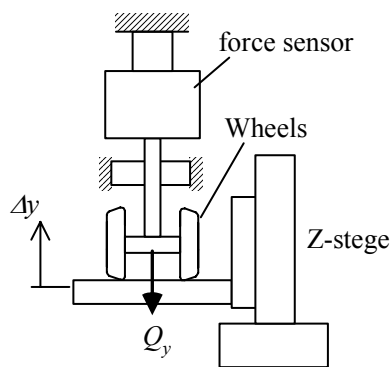
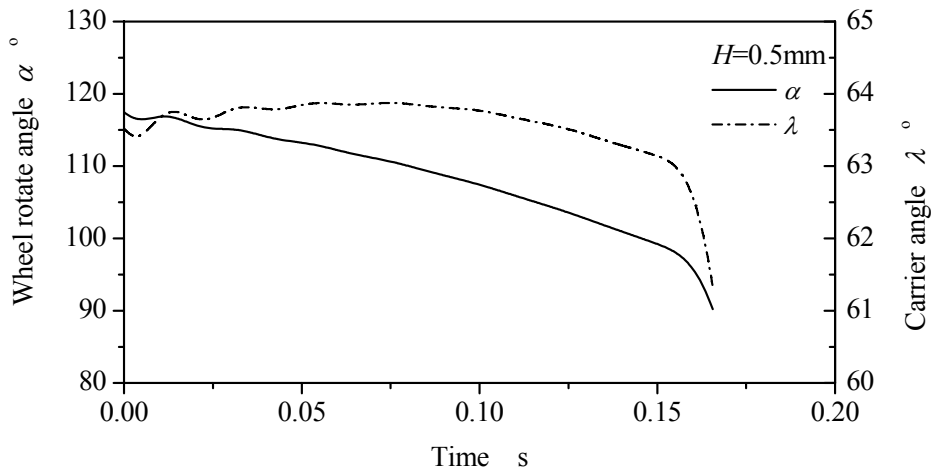
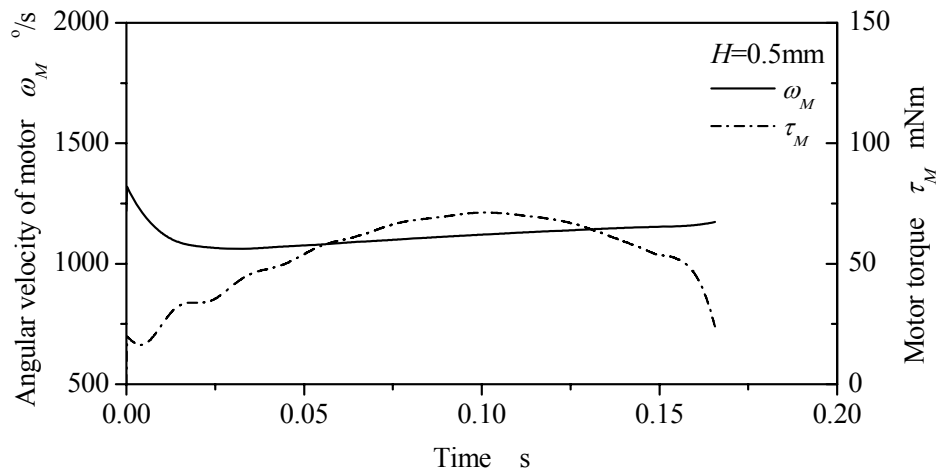


Fig.5.8 Characteristic of elastic wheels

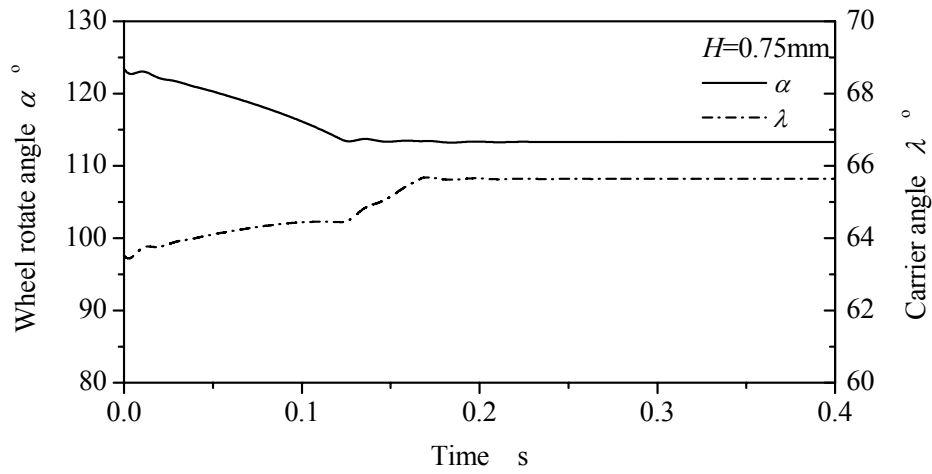


(a) Wheel angle and carrier angle

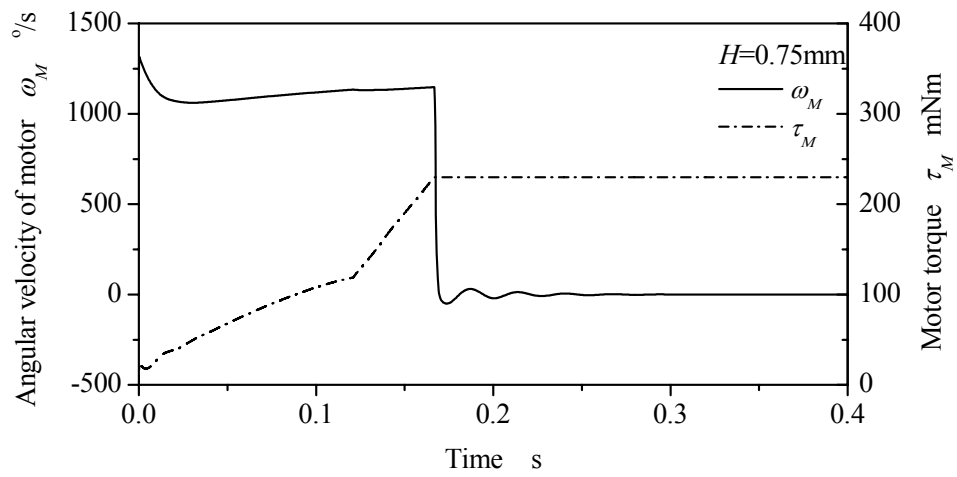


(b) Angular velocity and motor torque

Fig.5.9 Dynamic simulation for wheel drive mechanism with elastic wheel ($H=0.5\text{mm}$)



(a) Wheel angle and carrier angle



(b) Angular velocity and motor torque

Fig.5.10 Dynamic simulation for wheel drive mechanism with elastic wheel ($H=0.75\text{mm}$)

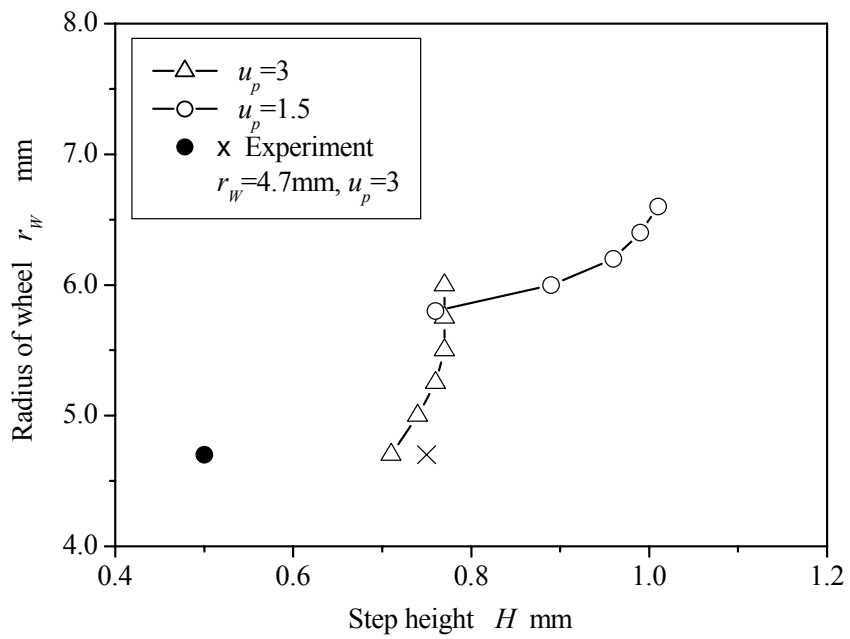


Fig.5.11 Relation between step height and radius of wheel in case of elastic wheel

5.4 段差管による走行実験

段差を有するアクリルパイプを製作して走行実験を行い、段差通過時のモータの速度とトルクを測定した。図 5.12 に実験装置の外観、図 5.13 に実験結果を示す。図 5.13(a) は内径 49mm と 48mm のパイプを用い、 $V=10\text{mm/s}$ 、 $L=5\text{N}$ 、 $H=0.5\text{mm}$ の場合で、(i) が内径 49mm の走行時、(ii) が車輪が段差に接触して車輪に加わる負荷が徐々に大きくなっている状態、(iii) が段差を乗り越えている状態、(iv) が段差を完全に乗り越えて内径 48mm の管内を走行し始めた状態を示す。モータの速度とトルクの実験結果（図 5.13(a)）は解析結果（図 5.9(b)）の時間変化の波形とほぼ同じ傾向を示している。段差接触後のモータ速度の最低値および段差乗り越えに要したトルク（図 5.13(a) の(i) と(iii) の差）の最大値は計算結果とほぼ一致している。ここで、(ii) の段差に接触してから(iv) の段差を乗り越える区間の時間が解析結果と差が生じているが、これは段差に接触する 4 つの車輪がわずかな時間ずつずれて段差を乗り越えているためであると考えられる。また、完全に乗り越えた後にモータ速度は急激に高くなっているがこれは段差通過でキャリアが回転し、それに伴い太陽歯車の回転速度が増加された分がモータ速度に加味されたためである。

図 5.13(b) は内径 49.5mm と 48mm のパイプを用い、 $V=7.6\text{mm/s}$ 、 $L=1\text{N}$ 、 $H=0.75\text{mm}$ の場合であり、(v) が内径 49.5mm の走行時、(vi) が車輪が段差に接触して車輪に加わる負荷が徐々に大きくなっている状態、(vii) がモータトルクが最大値に達した状態、(viii) がモータが停止した状態を示す。この場合も実験結果（図 5.13(b)）は解析結果（図 5.10(b)）の波形と同じ傾向を示している。図 5.11 に示す●印は乗り越えができた場合、×印は乗り越えができなかった場合であり、いずれの実験結果は解析結果とほぼ一致しており、車輪の弾性変形を考慮した解析の妥当性が確認できた。

段差乗り越えに必要なモータトルクは、式(5.44)の計算結果に直管走行時のトルクを加算したものであり、直管走行時のモータトルクは第 3 章で得られており容易に試算できる。

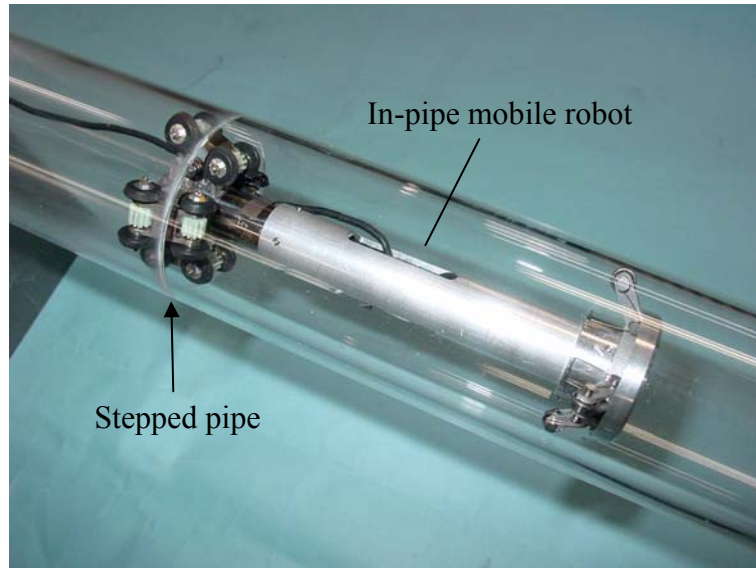
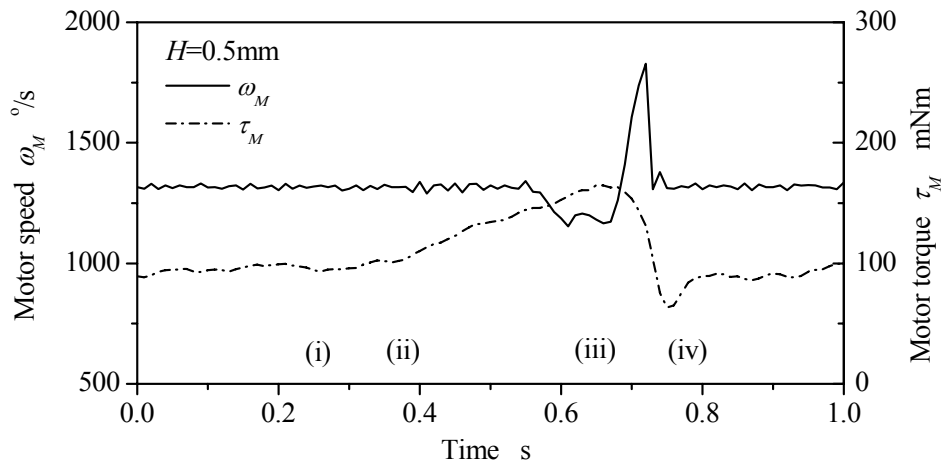
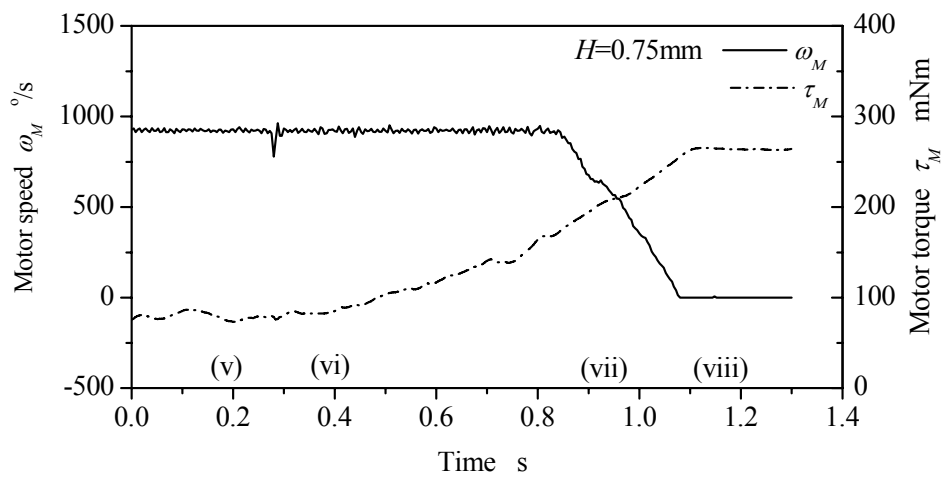


Fig.5.12 Experimental apparatus for step climbing



(a) $H=0.5\text{mm}$



(b) $H=0.75\text{mm}$

Fig.5.13 Time histories of experimental motor speed and torque

5.5 段差通過を考慮したロボット機構の設計指針

これまでの検討結果から、段差通過を考慮した遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた管内移動ロボットの設計指針は次の通りとなる。

設計指針

車輪走行機構を構成する太陽歯車と遊星歯車のかみあい点の位置が車輪と段差が接触する位置より前方となる幾何学的条件を満たすことで段差を乗り越えられるので、その条件を満たすように太陽歯車、遊星歯車、車輪径を設計する。

(1) 車輪

車輪は外径が大きくなればキャリア角度 λ が小さくなり、太陽歯車と遊星歯車のかみあい点の位置が前方に移動する。キャリアには車輪が2組支持されているので、車輪が接触しない限りに大きくする。また、段差部の最小内径通過時のキャリア角度がロボットの最小外径よりも大きくなるようにする。

(2) 太陽歯車と遊星歯車

車輪走行機構のモータから車輪までの歯車列の速比は遊星歯車の大きさ（歯数）で決定され、歯数が大きいほど車輪の回転速度は減速され、回転トルクは逆に増大する。太陽歯車を小さくすれば遊星歯車は大きくできる。しかしながら、遊星歯車を大きくすると、車輪は太陽歯車などと干渉する。よって、太陽歯車と遊星歯車の歯数は、 $z_G > z_P$ とし、車輪の大きさを考慮に入れて太陽歯車、遊星歯車などと干渉しない限りに太陽歯車を小さくする。

(3) 設計例

今回の解析で比較した太陽歯車と遊星歯車の速比 $u_P=3$ と $u_P=1.5$ について移動速度と最大牽引力を試算する。 $u_P=3$ の条件での遊星歯車の歯数は $z_P=10$ 、車輪半径は $r_W=4.7\text{mm}$ 、一方、 $u_P=1.5$ の条件では $z_P=16$ 、 $r_W=6.2\text{mm}$ である。移動速度は第3章の式(3.24)より得られ、それぞれ $0.47\omega_M$ 、 $0.39\omega_M$ である。最大牽引力は第3章の式(3.28)より得られ、それぞれ $2.1\tau_M$ 、 $2.5\tau_M$ となる。太陽歯車と遊星歯車の速比 $u_P=1.5$ の設計は、移動速度は低下するが、乗り越えられる段差高さは大きく、最大牽引力も向上することがわかった。

5.6 まとめ

遊星歯車式管径追従車輪走行機構を有する小口径内移動ロボットの段差走行時の走行特性に関して、理論解析と実験検証を行った。車輪走行機構の車輪を剛体として扱った解析では理論と実験が一致しなかったために、車輪の弾性変形を考慮して解析を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 車輪の段差の角部まわりの回転運動を考慮した解析モデルに連立微分方程式の数値解法により順動力学解析を行う手法を適用して解析を行い、実験でその妥当性を検証した。
- (2) 車輪走行機構を構成する太陽歯車と遊星歯車のかみあい点の位置が車輪と段差が接触する位置よりも前方となる幾何学的条件を満たすことで段差を乗り越えられることを明らかにした。
- (3) 車輪の弾性変形を考慮して求めた解析手法を用いることで段差通過の現象が把握でき、段差を乗り越えられる管内移動ロボットの機構設計を可能にした。

第6章 車輪走行機構用高出力アクチュエータの小型化

6.1 はじめに

配管形状に応じたロボットの具体的な設計指針を確立するために第3章では直管走行時、第4章では曲管走行時、第5章では段差走行時の力学特性を明らかにしてきた。本章では、小口径管内移動ロボットを構成する高出力アクチュエータの小型化について検討する。このロボットの動力源に、制御性に優れ、力/自重比が大きいサーボ機構が使用できればシステム全体は小型軽量でコンパクトになり、システムの運動性能を向上させることが可能となる。そこで、ブラシレス DC モータと減速機構を組み合わせてトルク/自重比を大きくさせて小型、高出力のサーボアクチュエータを実現するための設計法を提案する。まず6.2節で、小型サーボアクチュエータの構造を提案し、6.3節において、細径でかつ短尺化に適したブラシレス DC モータの磁極構造と3K型不思議遊星歯車減速機構を検討⁽⁵²⁾し、それぞれについて詳細設計と試作を行う。そして、6.4節で試作機の諸特性を測定し、既存のアクチュエータと比較検討する。

6.2 小型サーボアクチュエータの提案

サーボモータに遊星歯車減速機を内蔵した構成は、最もコンパクトで、小型化に適している。そこで、本節ではエンコーダを装着したブラシレス DC サーボモータと3K型不思議遊星歯車減速機構を同軸上に一体化させたサーボアクチュエータを提案する。ブラシレス DC モータはブラシと整流子からなる機械的整流機構が電子化されたことにより部品点数が低減されてシンプルな構造となった。また、形状、構造の設計自由度が大きくなり他の部品との一体化が容易となった。3K型不思議遊星歯車減速機構は構造がシンプルでありながら高減速比が得られ、小型化に適する機構である。

図6.1に提案した小型サーボアクチュエータの構成を示す。3相のブラシレス DC モータのロータ軸両端に遊星歯車減速機の入力軸である太陽歯車 a とエンコーダのスケールを装着させてアクチュエータの短尺化をはかっている。ステータヨークを兼用するモータケースの内側に薄形の空心コイルを複数個配置し、その内空で軸受に回転支持された希土類磁石からなるロータを回転させる。エンコーダは2相出力のMR素子を用いた磁気式エンコーダである。ブラシレス DC モータの制御用にロータの位置検出を行うためのホール素子をロータとエンコーダの間のスペースに3個装着した。

6.3 小型高出力アクチュエータの設計

6.3.1 ブラシレス DC モータ

3相ブラシレス DC モータの発生トルクを大きくするには、ロータの極数を多くし、かつコイルを通過する磁束を大きくさせると良い。しかし、外径を大きくできない場合には、磁極と磁束を同時に増やすことは困難である。そこで、3相モータの構造で適切な極数を求めるために、極数とコイル数の組み合わせを変化させ、そのときに発生するトルクの大きさを試算した。試算は図6.2に示すモデルを用いて汎用2次元磁場解析ツール (MagNet) を使用した。

図 6.3 に試算した磁束密度分布を，図 6.4 に極数とコイル数の組み合わせと発生トルクの関係を示す。試算した極数とコイル数の組み合わせは，1) 4 極 6 コイル，2) 6 極 9 コイル，3) 8 極 6 コイル，4) 12 極 9 コイル である。以下，4 極 6 コイルを BM#A，6 極 9 コイルを BM#B，8 極 6 コイルを BM#C，12 極 9 コイルを BM#D と呼ぶ。試算時の材料定数は磁石材をネオジ焼結マグネット，ヨーク材を電磁鋼板，コイルは空心コイルとした。コイル有効長は軸方向のコイルの長さとして定義した。コイル数が少なくなるほど外周 R が大きくなるため有効長は短くなる。BM#D は，磁気空隙に比べ磁石円弧長が短いため，磁石から発生する磁束が隣接する極への短い経路を通ってしまう。これに対して，図 6.3 に示した BM#A は磁石から発生した磁束は，コイルを鎖交しヨーク材を通る経路になっている。

試算結果から，発生トルクは BM#D，BM#C，BM#B，BM#A の順に大きくなり，最大になる極数とコイル数の組み合わせは BM#A である。BM#A は BM#D に比べて，発生トルクは 1.48 倍であり，同じトルクを発生させた場合の電流は約 68% に低減できると推定できる。

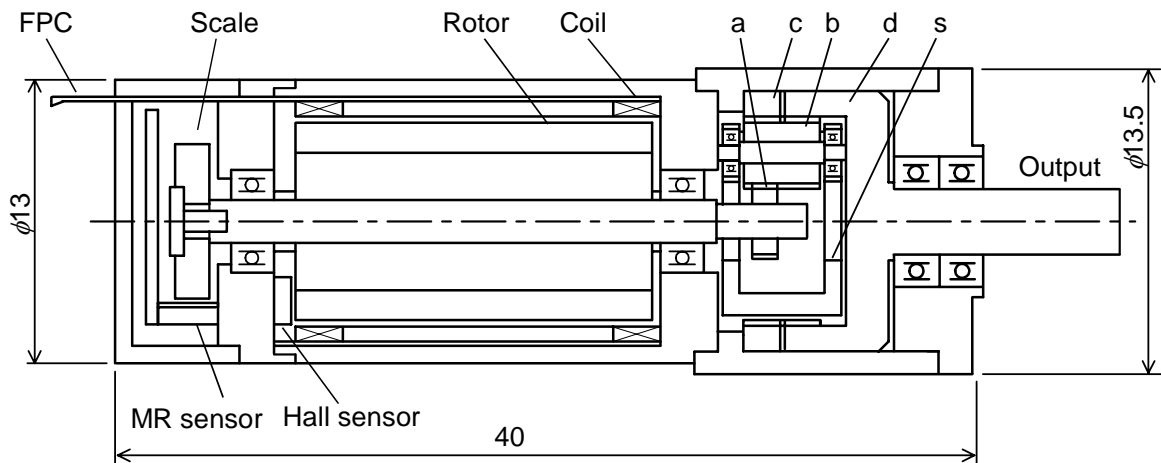


Fig.6.1 The cross-sectional view of the servoactuator with reduction gear

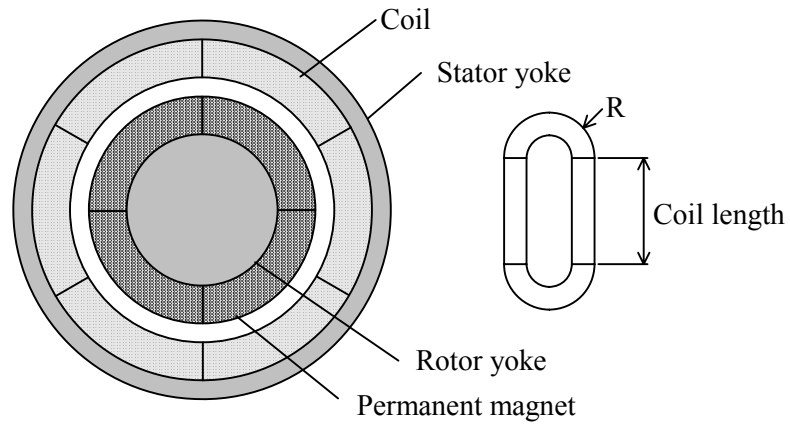


Fig.6.2 Calculation model of brushless DC motor

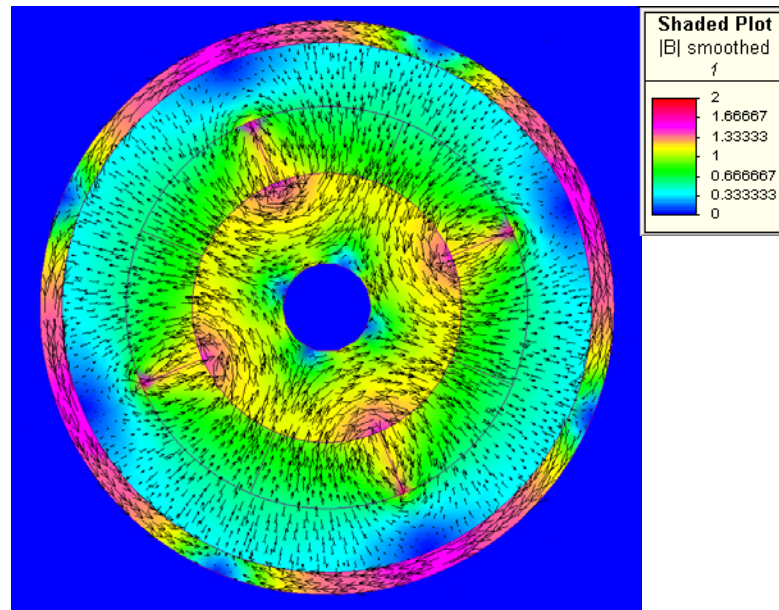


Fig.6.3 The calculated magnetic-flux density (4 poles, 6 coils)

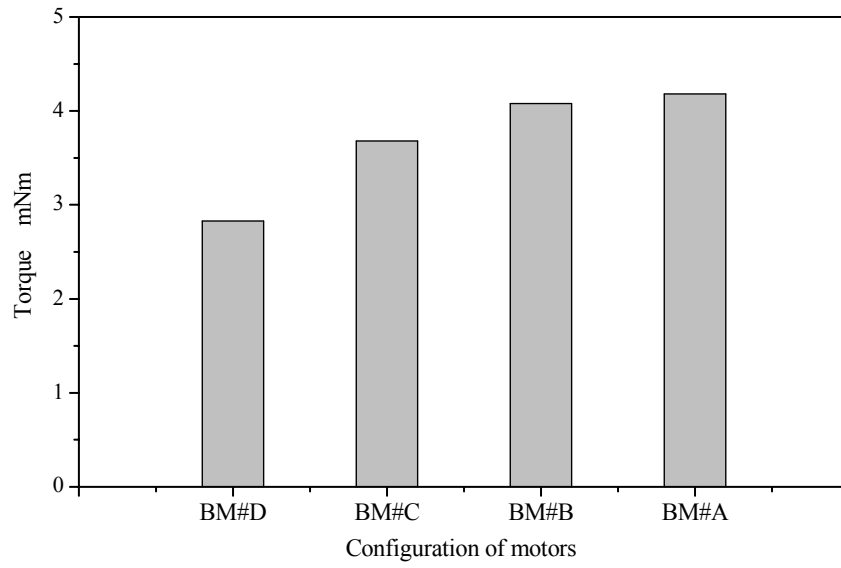


Fig.6.4 The calculated motor torque

6.3.2 3K型不思議遊星歯車減速機

3K型不思議遊星歯車減速機は図2.7に示したように、入力となる太陽歯車aが遊星歯車bとかみあい、この遊星歯車bは歯数が互いに異なる固定内歯車cおよび回転内歯車dと同時に噛みあい、回転内歯車dから出力される。通常3個の遊星歯車を使用するので、合計6個の歯車から構成され、減速比1/60～1/1000を得ることができる。遊星歯車はキャリアsによって太陽歯車と両内歯車に対して高精度に等配され、かつ回転支持されている。減速機は太陽歯車と遊星歯車との歯車対(a-b)、遊星歯車と固定内歯車との内歯車対(b-c)および遊星歯車と回転内歯車との内歯車対(b-d)の中心距離が一致する機構であるために転位歯車が使用されている。

減速機の減速比 u および理論効率 η は、歯車対(a-b)、内歯車対(b-c)および内歯車対(b-d)の基準効率をそれぞれ η_a 、 η_c 、 η_d とすると、次の式で与えられる⁽⁴⁸⁾。

$$u = \frac{1 - i_{cd}}{1 + i_{ca}} \quad (6.1)$$

$$\eta = u \frac{(1 + i_{ca}\eta_a\eta_c)}{(1 - i_{cd}\eta_c\eta_d)} \quad (6.2)$$

$$\eta_\xi = 1 - \mu\pi \left(\frac{1}{z_b} \pm \frac{1}{z_\xi} \right) \varepsilon_{0,\xi} \quad (\xi = a, c, d) \quad (6.3)$$

ここで、 i_{ca} 、 i_{cd} は歯数比でそれぞれ $i_{ca}=z_c/z_a$ 、 $i_{cd}=z_c/z_d$ であり、 z_a 、 z_b 、 z_c 、 z_d は太陽歯車a、太陽歯車b、固定内歯車cおよび回転内歯車dの歯数である。また、 μ は歯面摩擦係数、 $\varepsilon_{0,\xi}$ は噛みあい率因子⁽⁴⁸⁾で、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{0,a} &= \varepsilon_{1,a}^2 + \varepsilon_{2,a}^2 + 1 - \varepsilon_{1,a} - \varepsilon_{2,a} \\ \varepsilon_{0,c} &= \varepsilon_{1,c}^2 + \varepsilon_{2,c}^2 + 1 - \varepsilon_{1,c} - \varepsilon_{2,c} \\ \varepsilon_{0,d} &= \varepsilon_{1,d}^2 + \varepsilon_{2,d}^2 + 1 - \varepsilon_{1,d} - \varepsilon_{2,d} \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

ここで、 $\varepsilon_{1,\xi}$ と $\varepsilon_{2,\xi}$ は、近寄り噛みあい率と遠退き噛みあい率である。

3つの歯車対の基準効率 η_a 、 η_c 、 η_d の効率 η に対する影響は、太陽歯車の基準効率 η_a に比べて内歯車の基準効率 η_c 、 η_d の方が大きく、内歯車対の基準効率の積 $\eta_c \cdot \eta_d$ が最大になるように設計することで高い効率が得られることになる。式(6.3)の第2項は歯車対の損失率を表すもので、 $\mu\pi$ が摩擦係数因子、 $(1/z_b \pm 1/z_\xi)$ が歯数因子、 $\varepsilon_{0,\xi}$ が噛みあい率因子で、これらの因子の値が大きくなると損失率が増加し、基準効率が低下することになる。

歯面摩擦係数は、減速機に注入された潤滑剤のかくはん損失や各軸受の損失などを歯車対のかみあい損失に含めたものである。これまで試作した、歯数がそれぞれ $z_a=16$ 、 $z_b=28$ 、 $z_c=71$ 、 $z_d=74$ 、減速比が $u=1/134.13$ の減速機の効率は50%台であり、この結果から摩擦係数は $\mu=0.25$ 程度と推定できる。外径13mm程度で減速比が1/100～1/300の場合の各歯車の組み合わせと歯数因子 $(1/z_b \pm 1/z_\xi)$ の結果を表6.1に示す。歯数因子の値は、摩擦係数因子 $\mu\pi$ の値に比べてかなり小さな値であることがわかる。噛みあい率因子は各歯車対の近寄り噛みあい率と遠退き噛みあい率によって求められ、従来設計法の不思議遊星歯車減速機構では内歯

車対の転位係数の差が特に大きいために、近寄りかみあい率と遠退きかみあい率の差が大きくなっている。一歯がかみあう間の損失を最小にするには、(近寄りかみあい率) + (遠退きかみあい率) = 一定として、(近寄りかみあい率) = (遠退きかみあい率) とすると損失は最小になる⁽⁴⁸⁾。よって、かみあい率因子 $\varepsilon_{0,c}$ (または $\varepsilon_{0,d}$) は、かみあい率 ε_c (または ε_d) を小さくし、かつ $\varepsilon_{1,c}/\varepsilon_{2,c}=1$ (または $\varepsilon_{1,d}/\varepsilon_{2,d}=1$) にすることで最小となり、効率は改善されることになる。

そこで、小型の減速機的设计では内歯車対の近寄りかみあい率と遠退きかみあい率を等しくするように歯先円径を増減させてかみあい率を均一化する効率改善設計法⁽⁵⁹⁾を適用した。内歯車対のかみあい率は必要最小限のかみあい率を確保(歯車対(a-b)で1.1以上、歯車対(b-c)と(b-d)で1.2以上) させることを前提にして、かみあい作用線上でピッチ点から遠いかみあい部分の歯先は除去し、ピッチ点から近いかみあい部分の歯先を伸ばした。歯先円径を増減させるとこれまでは同一寸法であった遊星歯車 b の歯先円径は、固定内歯車 c とかみあう部分で従来設計より大きくし、回転内歯車 d とかみあう部分で小さくした。さらに、従来設計では同一寸法であった両内歯車 c, d の歯先円径についても同様に固定内歯車 c を大きく、回転内歯車 d を小さくした。

Table 6.1 Combination of gear pairs

u	Number of teeth	$1/z_b+1/z_a$	$1/z_b-1/z_c$	$1/z_b-1/z_d$
1/115	$z_a=12, z_b=23,$ $z_c=57, z_d=60$	0.1268	0.0259	0.0268
1/205	$z_a=21, z_b=41,$ $z_c=105, z_d=108$	0.0720	0.0149	0.0151
1/280	$z_a=24, z_b=53,$ $z_c=129, z_d=132$	0.0605	0.0111	0.0113
1/134.13	$z_a=16, z_b=28,$ $z_c=71, z_d=74$	0.0982	0.0216	0.0222
1/243.67	$z_a=27, z_b=50,$ $z_c=126, z_d=129$	0.0570	0.0121	0.0122

6.4. アクチュエータの試作と諸特性

6.4.1 ブラシレス DC モータの特性

ブラシレス DC モータの磁極数による出力特性の比較を実験で調べた。試作したモータは BM#A と BM#D である。磁石はそれぞれ希土類磁石 (Nd-Fe-B) で、コイルは BM#A が線径 0.15mm, ターン数 52, BM#D が線径 0.15mm, ターン数 33 の空心コイルである。モータサイズはいずれも外径 13mm, 長さ 20mm である。

表 6.2 に実験で得られたモータの特性表を, 図 6.5 に定格電圧(12V)を印加した時のモータ単体のトルク-回転数, 電流線図をそれぞれ示す。BM#A のトルク定数 K は, BM#D と比べて 3.7mNm/A 向上して, $K=7.9\text{mNm/A}$ が得られた。高トルク域での電流値は低減し特性は改善されている。しかしながら, 低トルク域では無負荷時電流 I_0 は BM#D と比べて約 2 倍の $I_0=0.35\text{A}$ となっており, 逆に電流は増加している。これは鉄損の増加が原因であり, BM#A のステータヨークの形状を検討した。ステータヨークの外径は変化させずに肉厚のみを変化させたときの無負荷時の特性を図 6.6 に示す。ステータヨークの肉厚を薄くすることで無負荷電流を低減させることができた。肉厚を薄くした外径 12.6mm のブラシレス DC モータ (BM#A1) の特性は図 6.5 の実線で示すように, 無負荷電流の低減と回転数の増加の改善が達成されている。よって, サーボアクチュエータには特性および磁石とコイルの製造性を考慮して, 4 極 6 コイル構成で外径 12.6mm のブラシレス DC モータ BM#A1 を用いることにした。図 6.7 に BM#A1 に使用する空芯コイルの外観を示す。

Table 6.2 Characteristics of the brushless DC motors

	BM#A	BM#D	BM#A1
Diameter × Length [mm]	13×20	13×20	12.6×20
Armature resistance [Ω]	3.26	3.75	3.26
Rated voltage [V]	12	12	12
Friction torque [mNm]	2.8	0.71	1.39
No-load current I_0 [A]	0.35	0.17	0.31
No-load speed [rpm]	14,145	27,900	16,180
Stall torque [mNm]	8.6	4.93	7.77
Stall current [A]	1.43	1.35	1.39
Torque constant K [mNm/A]	7.9	4.2	7.4

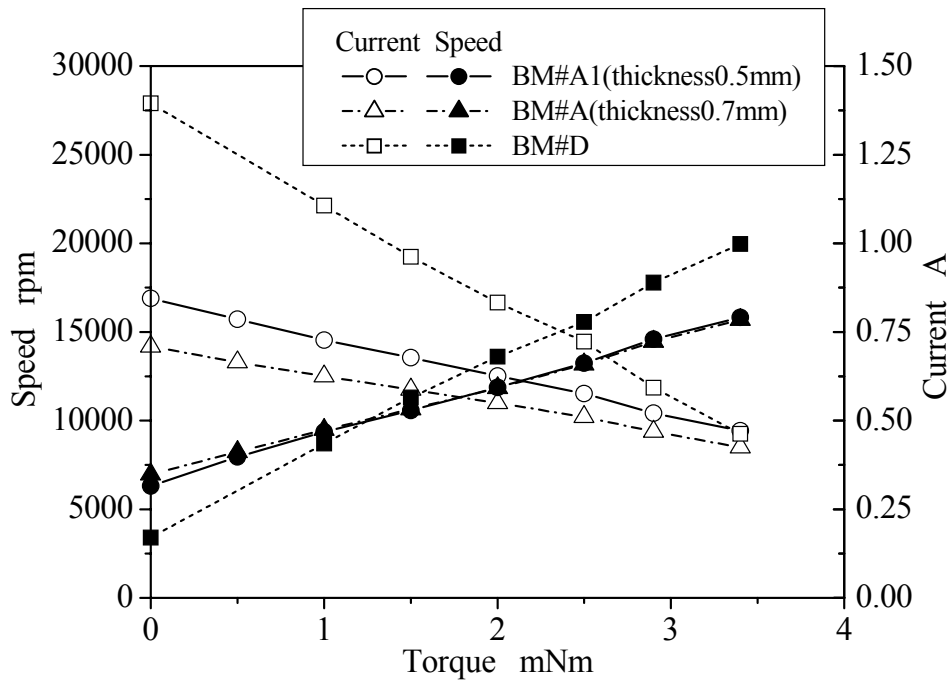


Fig.6.5 Relations between torque and speed, and between torque and current of the brushless DC motors

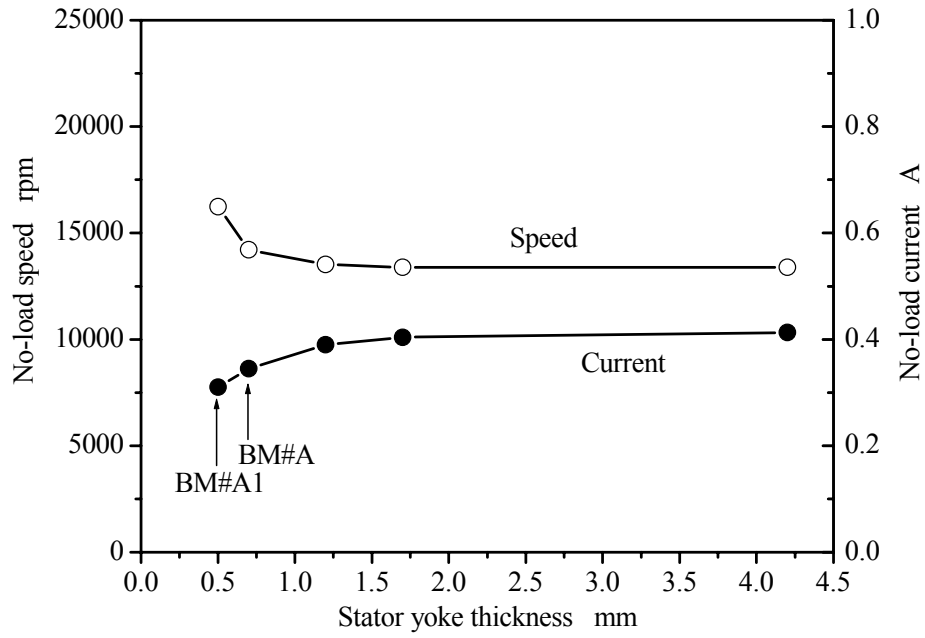


Fig.6.6 Relations between yoke thickness and speed, and between yoke thickness and current of the brushless DC motors

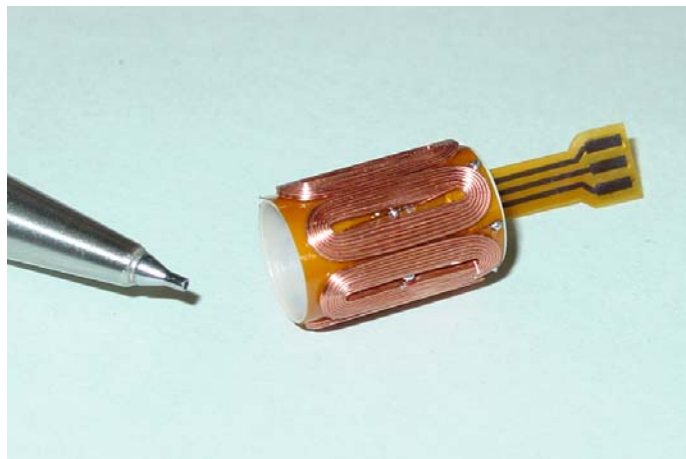


Fig.6.7 Photograph of the coil assembly (BM#A1)

6.4.2 3K型不思議遊星歯車減速機の特性

3K型不思議遊星歯車減速機の効率改善の効果を調べるために、改善設計と従来設計のそれぞれに対して減速比が異なる2種類の減速機を試作した。改善設計ものをGDA#1, GDA#2, 従来設計ものをGDB#1, GDB#2と呼ぶ。GDA#1, GDB#1は歯数がそれぞれ $z_a=16$, $z_b=28$, $z_c=71$, $z_d=74$, 減速比が $u=1/134.13$, GDA#2, GDB#2は歯数 $z_a=27$, $z_b=50$, $z_c=126$, $z_d=129$, 減速比 $u=1/243.67$ の減速機である。表6.3, 6.4に改善設計の減速機GDA#1, GDA#2に使用されている歯車の歯車諸元を示す。従来設計の減速機GDB#1, GDB#2の歯車のモジュール, 歯数, 転位係数は, 改善設計の歯車と同じ諸元で, かみあい率はGDB#1が $\varepsilon_a=1.35$, $\varepsilon_c=1.52$, $\varepsilon_d=1.78$, GDB#2が $\varepsilon_a=1.52$, $\varepsilon_c=1.67$, $\varepsilon_d=1.82$ である。改善設計の諸元では, 内歯車対のかみあい率は1.2以上で, かみあい率因子 $\varepsilon_{0,c}$, $\varepsilon_{0,d}$ は各減速機ともに0.52となり, 従来設計のGDB#1の $\varepsilon_{0,c}=0.975$, $\varepsilon_{0,d}=1.01$ およびGDB#2の $\varepsilon_{0,c}=1.10$, $\varepsilon_{0,d}=1.15$ と比較して約半分程度の値になっている。

歯面摩擦係数 μ を変化させたときの, 効率 η を従来設計と改善設計による値をそれぞれ図6.8に示す。従来設計に比べて改善設計では効率が改善され, 歯面摩擦係数が大きいほどその差は大きくなる。歯面摩擦係数が潤滑の劣化, 歯面の形状精度や表面粗さなどの影響で大きくなっても, 効率の低下が少なくできるという効果がある。小型減速機の歯面摩擦係数を $\mu=0.25$ とすると減速機の効率は10%程度向上して60%台に改善される。

図6.9に試作した減速機GDA#1の主要部品と改善設計および従来設計の遊星歯車の外観を示す。改善設計の遊星歯車は固定内歯車とかみあう部分と回転内歯車とかみあう部分の歯先円径が異なるため歯車の歯先が段付き形状になっている。遊星歯車は一体構造のキャリアに軸受で支持され, 固定内歯車はケースに固定され, 回転内歯車は出力軸と一体化されている。減速機単体はいずれも外径13.5mm, 長さ14.3mmで, 質量は14gである。遊星歯車は段付き形状のブランクをホブで歯切り加工して製作した。他の太陽歯車はホブによる歯切り, 内歯車(固定, 回転内歯車)は内歯車と同じ諸元をもつブローチを作り, ブローチ加工で製作した。歯車材料は焼き入れしたステンレス鋼である。

Table 6.3 Gear dimensions (GDA#1)

	a	b	c	d
Module m (mm)	$m=0.14$			
Number of teeth z_i ($i=a,b,c,d$)	16	28	71	74
Profile-shift coefficient	0.408	0.32	1.682	0
Addendum circle diameter (mm)	2.505	4.378 4.039	10.261	10.069
Face width (mm)	1.5	3.8	1.8	1.8
Center distance (mm)	$A(ab) = A(bc) = A(bd) = 3.172$			
Contact ratio ε_i ($i=a,b,d$)	$\varepsilon_a = 1.36, \varepsilon_c = 1.2, \varepsilon_d = 1.2$			
The difference of addendum circle diameter (mm)	-0.11	+0.107 -0.232	+0.187	-0.005

Table 6.4 Gear dimensions (GDA#2)

	a	b	c	d
Module m (mm)	$m=0.08$			
Number of teeth z_i ($i=a,b,c,d$)	27	50	126	129
Profile-shift coefficient	0.391	0.32	1.613	0
Addendum circle diameter (mm)	2.298	4.247 4.066	10.277	10.147
Face width (mm)	1.5	3.8	1.8	1.8
Center distance (mm)	$A(ab) = A(bc) = A(bd) = 3.134$			
Contact ratio ε_i ($i=a,b,d$)	$\varepsilon_a = 1.39, \varepsilon_c = 1.2, \varepsilon_d = 1.2$			
The difference of addendum circle diameter (mm)	-0.078	+0.042 -0.139	+0.119	-0.011

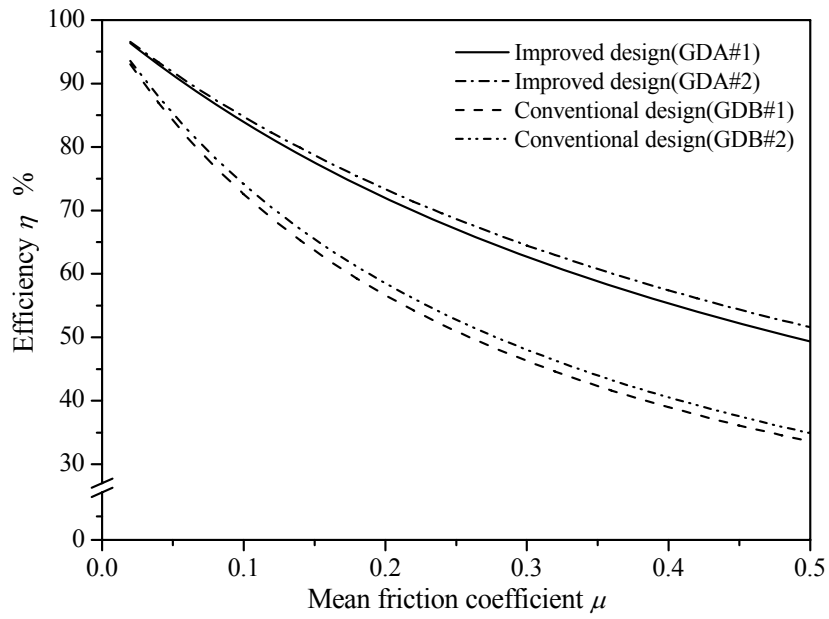


Fig.6.8 The theoretical efficiency of reduction gears

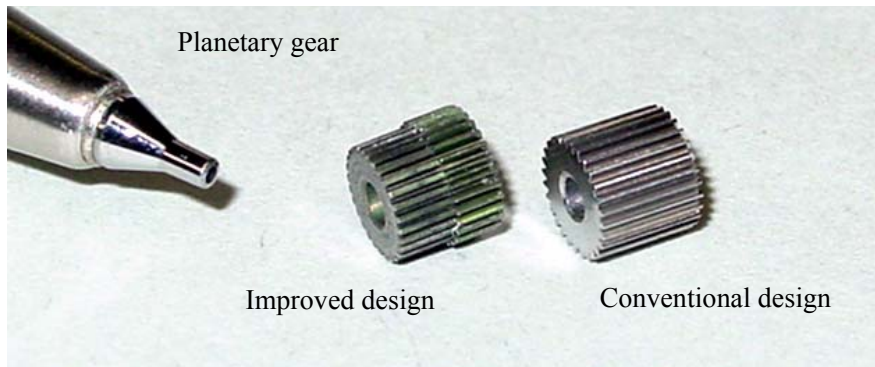


Fig.6.9 Photograph of the reduction gears



Fig.6.10 Photograph of the servoactuators with reduction gears

6.4.3 アクチュエータの出力特性

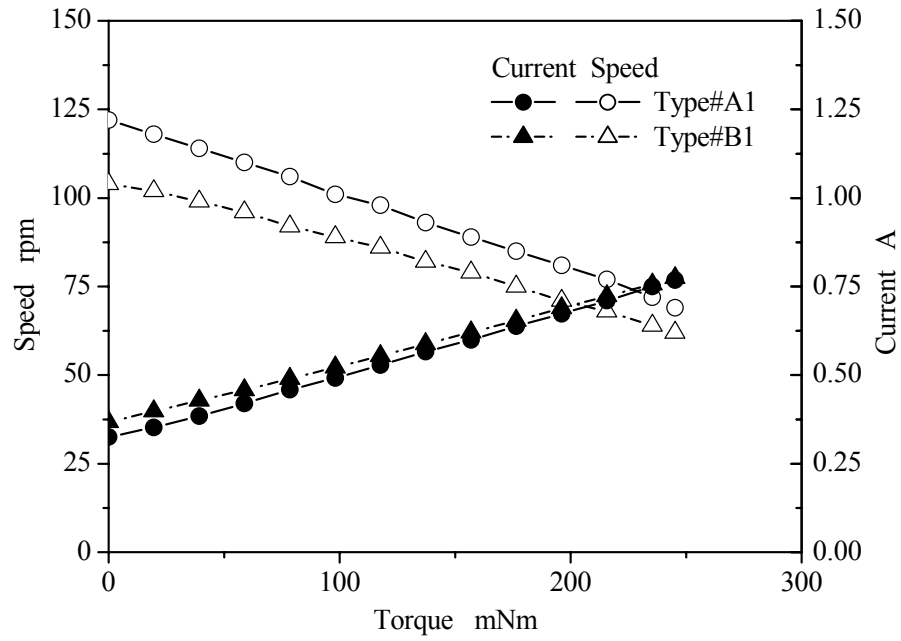
試作したアクチュエータは、ブラシレス DC モータ BM#A1 に減速機 GDA#1, GDA#2 を、BM#A に GDB#1, GDB#2 装着したもの 4 種 (Type#A1, Type#A2, Type#B1, Type#B2 と呼ぶ) である。アクチュエータ Type#A1 と Type#B1 の設計トルクは 0.25Nm, Type#A2 と Type#B2 の設計トルクは 0.45Nm である。各アクチュエータともにサイズと質量は同じであり、外径 13.5mm, 長さ 40mm, 質量 32g である。図 6.10 にアクチュエータ Type#A1 と Type#B1 の外観 (手前が Type#A1) を示す。それぞれのアクチュエータに定格電圧 12V を印加した時の出力軸特性を測定した。測定はヒステリシスブレーキで負荷を与える市販の動トルク測定装置を用いて、出力軸の回転を CW 方向に設定して運転し、出力軸トルクを設計トルクまでステップ状に手動で上昇させ、その時の値を計測した。

図 6.11 に各アクチュエータの特性グラフを示す。いずれも 3K 型不思議遊星歯車減速機には潤滑用に低粘度の油を少量使用した。アクチュエータの出力トルクに対する回転数および電流の関係は線形関係にあり、管内移動作業用ロボットのアクチュエータとして好ましい特徴を備えている。装着されているエンコーダは 2 相出力で分解能は 1 回転 220 パルスであり、表 6.5 に各アクチュエータの出力特性をまとめたものを示す。

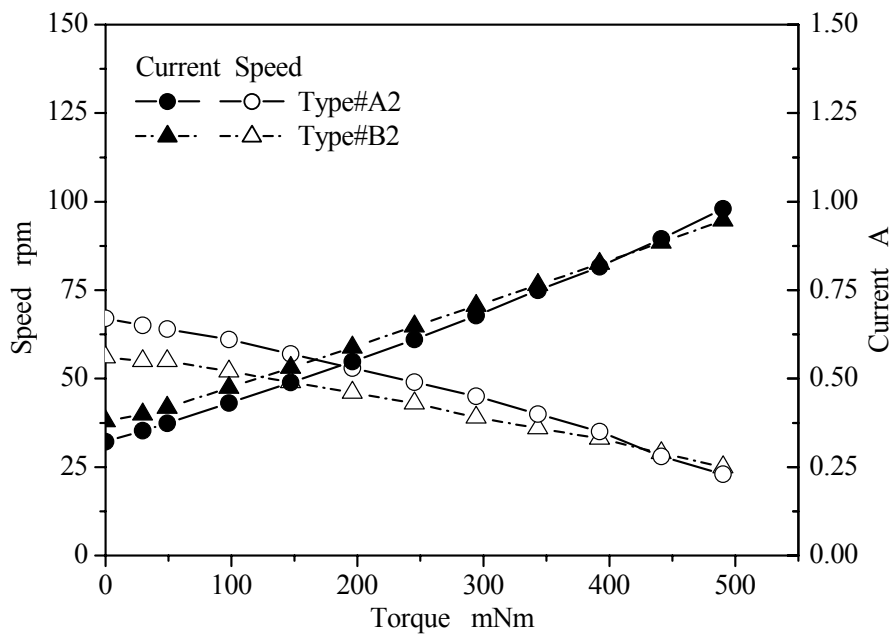
アクチュエータ Type#A1 と Type#B1 および Type#A2 と Type#B2 の出力特性を無負荷時と設計トルク時の電流で比較する。無負荷時は Type#A1, Type#A2 とともに電流は低減されている。設計トルク時は Type#A1 の電流は低減されているが、Type#A2 は Type#B2 とほぼ同等である。Type#A2 の設計トルク時の電流は Type#A1 と比べると高い。アクチュエータの連続運転が可能な電流はコイル発熱量から 0.8A 以下とし、アクチュエータの実用最大トルクは電流 0.8A 以下で発生できる最大トルクとする。Type#A1, Type#A2 それぞれの実用最大トルクは 0.25mNm, 0.38Nm となり、これらの結果を図 6.12 に記号●で示す。Type#A2 のトルク/体積比はこれまでのサーボアクチュエータ (破線) に比べて高く、図 6.12 より同じトルクを発生できる従来品と比べて体積は約 30%減を達成している。

Table 6.5 Characteristics of the servoactuators

Type	#A1	#A2	#B1	#B2
Diameter × Length [mm]	13.5×40		13.5×40	
Rated voltage [V]	12		12	
Output torque T_2 (Nm)	0.25	0.45	0.25	0.45
Output speed (rpm)	80	23	62	25
Current I (A)	0.68	0.98	0.78	0.95
Encoder output phase (phase)	A,B		A,B	
Encoder resolution (ppr)	220		220	
Reduction ratio u	1/134.13	1/243.67	1/134.13	1/243.67
Reduction efficiency η (%)	64	49	54	43
Mass (g)	32		32	



(a) Type#A1 and Type#B1



(b) Type#A2 and Type#B2

Fig.6.11 Relations between torque and speed, and between torque and current of the servoactuators

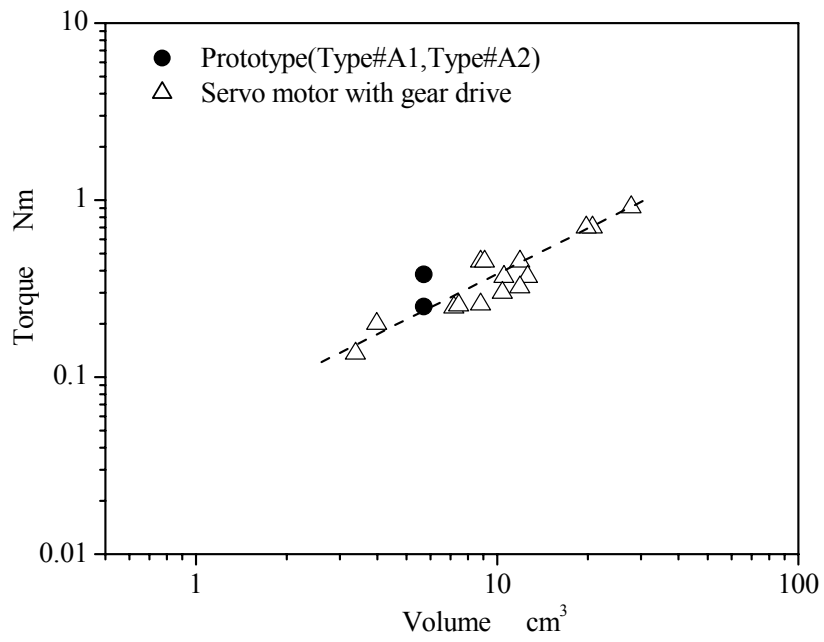


Fig.6.12 Relation between Volume and torque of the micro servoactuators

6.4.4 減速機の効率

減速機の減速効率 η は図 6.11 のアクチュエータの出力特性と図 6.5 のモータ単体特性から検討する．減速機出力トルクを T_2 ，減速機入力トルク（モータ単体の特性）を T_1 ，減速比を u とし，減速機効率 η は次式から算出した．

$$\eta = \frac{T_2 u}{T_1} = \frac{T_2 u}{KI} \quad (6.5)$$

ここで， K ， I はモータトルク定数，モータ電流である．図 6.13 に式(6.5)から算出した減速機の出力トルクと効率の関係を示す．減速機入力トルク T_1 は K ， I の積から算出する．改善設計の GDA#1，GDA#2 は設計トルクの範囲内で従来設計の効率より高く，効率改善の効果が確認できた．改善設計 GDA#1 は従来設計 GDB#1 と比べて中・高トルク域で効率は約 10%程度向上した結果が得られ，その最大効率は歯面摩擦係数 $\mu=0.25$ の理論値とほぼ一致する結果となっている．改善設計 GDA#2 は GDA#1 に比べて中・高トルク域での効率の向上が小さかった．GDA#2 の効率は GDA#1 に対して全体的に低く，モジュール 0.1mm 以下の微小モジュールの歯車の高精密加工およびキャリアの高精度組立の検討が今後必要であると考えている．

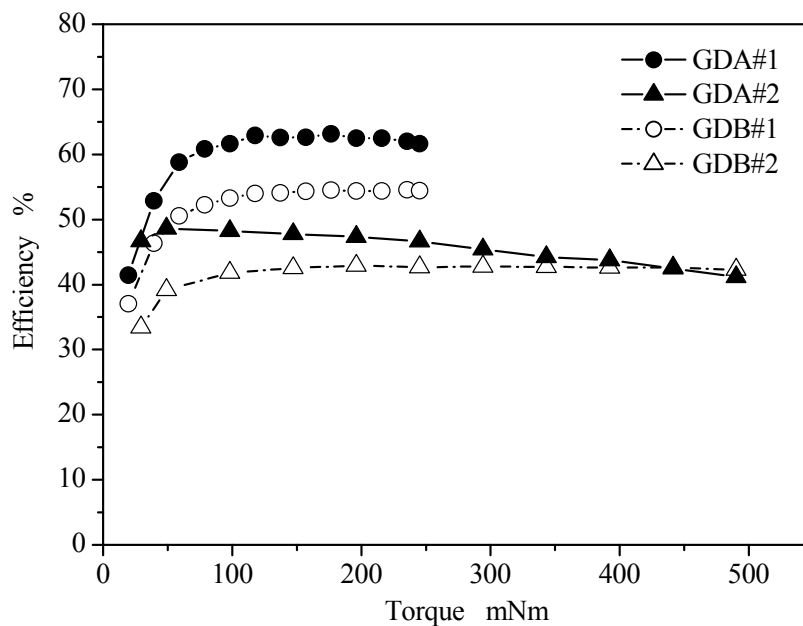


Fig.6.13 Relation between torque and efficiency of the reduction gear

6.5 まとめ

3K 型不思議遊星歯車減速機とブラシレス DC モータを組み合わせた小型サーボアクチュエータにおいて、高いトルク体積比を得るための設計法を検討し、試作機で基本特性に関する試験を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 外径 13mm, 長さ 40mm で出力 1.5W のサーボアクチュエータを 2 種類試作した。それぞれの実用最大トルクは回転数 37rpm 時の 0.38Nm と回転数 69rpm 時の 0.25Nm である。実用トルク 0.38Nm のものは同じトルクを発生できる従来品と比べ、トルク／体積比は高く体積の約 30% 減を達成した。
- (2) 小型の 3K 型不思議遊星歯車減速機の設計にかみあい率均等化による効率改善手法を適用することで効率は従来設計と比べて 10% 程度向上することを確認した。
- (3) 高トルク化を達成できるブラシレス DC モータの極数とコイル数は 4 極 6 コイルの構成であることを確認した。

第7章 小口径管内移動作業ロボットの設計・試作と走行試験

7.1 はじめに

発電施設や建屋などにおける小口径配管内を、配管を分解することなく内部から検査・補修する管内移動作業ロボットの実用化には、さまざまな形状（垂直管、曲管、段差管、分岐管）の管内を安定して走行でき、かつ高い信頼性を有する管内走行機構が必要である。この管内走行機構として、車輪を管壁に押付けつつ走行でき、異なる管径に対しても対応できる遊星歯車式管径追従車輪走行機構が有望で、共通の設計で1, 2, 3インチ管および1インチ以下の配管に適用できる機構であることを第2章で述べた。第3章から第5章では配管形状に応じたロボットの具体的な設計指針を確立するために直管内、曲管内、段差管内の走行時の力学特性を明らかにした。第6章では小口径管内移動ロボットの動力源として小型で高トルクのサーボアクチュエータの構成について検討を行った。

本章では、具体的に遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた小口径管内移動作業ロボットを設計・試作し、走行試験ならびに作業試験を行い、ロボットの走行特性および検査作業の評価が実用レベルにあることを検証する。

まず7.2節では、これまでに得られた知見から、遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた小口径管内移動作業ロボットの実用化のための設計指針をまとめる。次に7.3節では、2インチ管用のロボットにおいて、直管、曲管、段差管で構成された配管を用いて総合走行試験を行い、特別な制御が必要なく走行できることを確認する。7.4節では、1インチ管以下の極細径管内に適用できる管内移動作業ロボットのために、第6章で示した設計法を用い超小型のアクチュエータを開発し、このアクチュエータと車輪走行機構を一体化させた極細径管内移動ロボットを試作し、その走行特性を明らかにする。さらに、7.5節、7.6節では、それぞれ小口径管内移動作業ロボットを設計・試作し、1インチ管における検査・異物回収ロボットおよび配管内部放射能汚染測定ロボットの走行特性、作業機能が実用的な性能を有していることを検証する。

7.2 実用化のための設計指針

第2章から第6章までに得られた、遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた小口径管内移動作業ロボットの設計指針を以下に述べる。

- (1) ロボットの主要仕様である移動速度と最大牽引力から、遊星歯車の歯数、車輪半径と必要とされるモータの速度とトルクの関係を試算する。
- (2) 曲管の曲率半径と管内半径から決まる定数 (K_B) から、曲管走行時に必要な駆動トルクを上記(1)の結果から試算する。
- (3) ロボットの全長は短い方が曲管走行には有利であるので、アクチュエータは3K型不思議遊星歯車減速機とブラシレスDCモータを組み合わせ、極力短くなるように設計する。減速機の出力軸とウォームを一体化することで短尺化が可能となる。
- (4) フレキシブルカップリングは、曲げ剛性が小さく、曲管形状に沿って容易に変形できる構造のもの、例えば螺旋溝を有する金属製カップリングや薄肉のゴム製チューブなどで構成する。また、分岐管や曲率半径の小さい（曲率半径が内径と同じ）場合には、FMAと組み合わせ、能動的に曲管、分岐管に対応できる設計とする。
- (5) 段差通過には車輪走行機構を構成する太陽歯車と遊星歯車のかみあい位置が車輪と段差が接触する位置より前方となる幾何学的条件を満たすように機構設計を行う。また、段差の高さに応じた車輪の設計（外径、弾性変形部分の大きさ）を行う。
- (6) モータあるいはウォームの回転速度と回転角を検出することでロボットの自動運転が可能となるので、回転センサの配置を考慮した設計を行う。

7.3 直管，曲管，段差管で構成された管内の総合走行試験

7.3.1 設計仕様

管内を移動するロボットにおいて，構造がシンプルで小型でありながら，直管，曲管，段差管で構成されたさまざまな形状の配管内を走行できる必要がある．また，それらを通過する際に特別な動作や操作を行わないで，ロボットの前進・後退のみの制御で通過できることが望ましい．そこで，遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いたロボットでさまざまな形状の管内をロボットの前進・後退のみの動作で通過できるかを実験で確認する．

管内の総合走行試験に用いるロボットの設計にあたっては，以下に示す仕様を満足するように設計を行った．

- (1) 適用管内径は2インチ管用とする．
- (2) 曲管内を走行できるようにフレキシブルカップリングを使用する．曲管通過用のアクチュエータは使用しない．
- (3) 管内検査のための CCD カメラが装着できる構造とする．

総合走行試験のロボットは4.2節の図4.1に示した構成とする．ロボットが曲管内を通過できるように本体中央部のカップリングを曲管形状にそって弾性変形できるフレキシブルカップリングで構成する．このフレキシブルカップリングは曲管の形状に沿って受動的に変形することで，車輪走行機構とガイドユニットの中心軸と本体部の中心軸が管軸の接線と平行となることでロボットは曲管内を通過可能となる．フレキシブルカップリングは金属製円筒部材に螺旋状のスリットを加工したものを使用する．ロボットの動力源はエンコーダを内蔵した DC サーボモータを使用し，ロボットの移動速度と移動距離の制御を行う．

図7.1に2インチ管用の管内移動ロボットのシステム構成を示す．制御装置は PC，IO ボード，モータドライバから構成されている．ロボットは車輪走行機構を駆動させる DC モータとエンコーダが装着され，ロボット本体と制御装置はケーブルで接続されている．制御装置には車輪走行機構のモータ2台分の制御が可能である．ロボットの先端には CCD カラーカメラ（東芝製 IK-SM43H）⁽⁶⁰⁾が装着できることを確認している．

7.3.2 設計・試作

試作した総合走行試験のロボットの外観写真は図4.4に示すとおりである．寸法と質量は，外径 45mm，長さ 145mm，質量 150g である．フレキシブルカップリングは外径 25mm，全長 74mm，螺旋状スリット部分の長さ 54mm である．車輪走行機構は4個の車輪列から構成されたものとした．

車輪走行機構の動力源であるモータはギヤヘッド，エンコーダを装着した DC サーボモータで，寸法は外径 14mm，長さ 43mm である．このモータの特性は3.4節の図3.8に示したとおりである．太陽歯車，遊星歯車のモジュールは 0.5mm で歯数は 30，10 であり，車輪走行機構のウォームと太陽歯車間の速比，太陽歯車と遊星歯車間の速比は，それぞれ $u_P=1/30$ ， $u_G=3$ である．ロボットの車輪の半径は 4.7mm である．

7.3.3 直管，曲管，段差管で構成された管内の走行試験

試作したロボットを用いて直管，曲管，段差管を有する亚克力製の模擬配管で走行試験を行った．試験に用いた模擬配管の形状を図 7.2 に示す．管は内径 48.5mm の 2 インチ管とした．段差部，曲管部を有するもので水平面内のパターンと鉛直面内のパターンとした．ロボットは図中の A からスタートさせて，段差高さ 0.5mm の段差部，曲率半径 181.5mm の曲管部の順に通過させ，図中の B まで走行させた．ロボットの移動距離は 900mm，車輪の回転速度は 23rad/s に設定した．モータの制御は 3.4 節の実験と同じとした．両パターンともにロボットはスムーズな走行が実現できていた．図 7.3 に水平パターンの時の動作時間とモータトルクの関係を示す，図 7.4 に鉛直パターン時の動作時間とモータトルクの関係を示す．走行速度は両者ともに同じであり 10mm/s で動作した．図 7.3 の(i)の区間は段差部通過時，(ii)の区間は曲管部通過時，(iii)の区間は水平管走行時，図 7.4 の(i')の区間は段差部通過時，(ii')の区間は曲管部通過時，(iii')の区間は垂直管上昇時，をそれぞれ示す．鉛直パターンは曲管部を通過後に垂直管を上昇しているためロボットの自重とケーブルが負荷となりモータトルクが増加していることが確認できる．以上の結果から，7.3.1 項で述べた設計仕様をすべて満たしていることが検証できた．

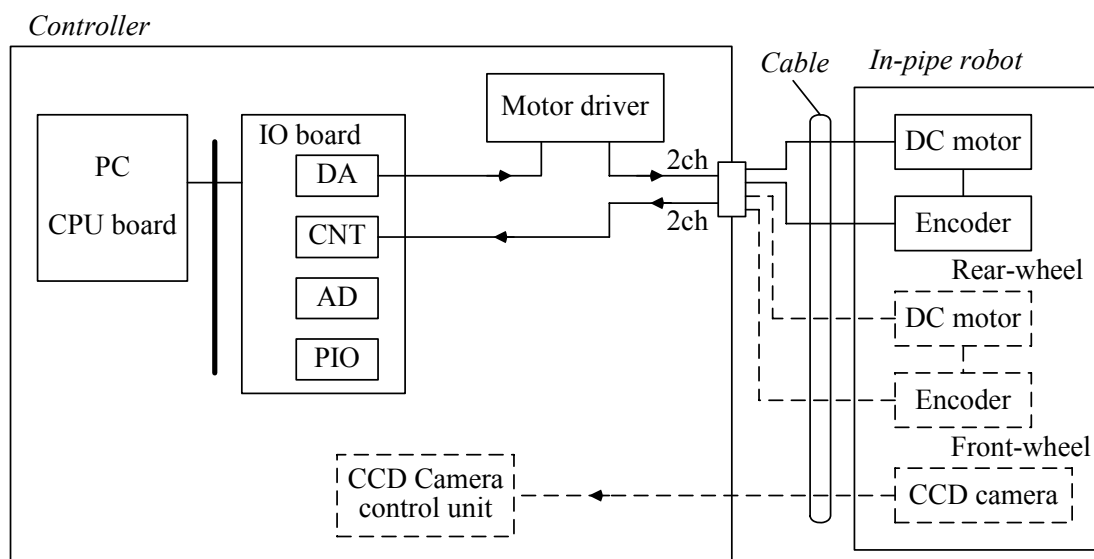
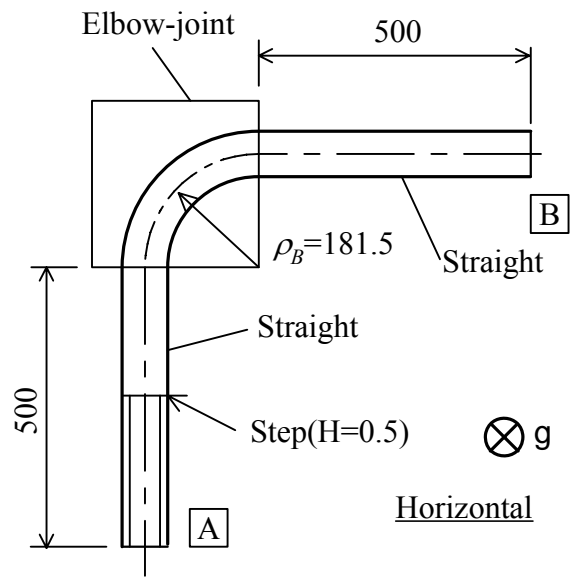
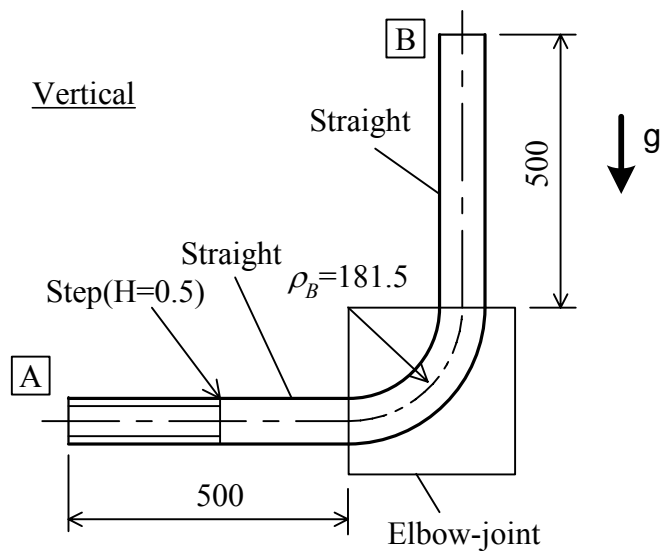


Fig. 7.1 Configuration of control system for 2-inch pipes



(a) Horizontal pattern



(b) Vertical pattern

Fig. 7.2 Configuration of test pipe for 2-inch pipes

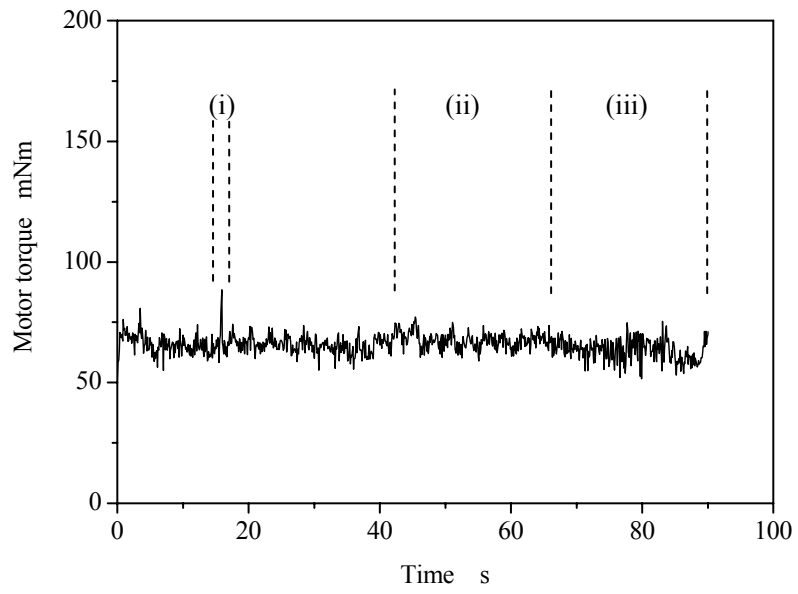


Fig. 7.3 Motor torque in the case of horizontal pattern

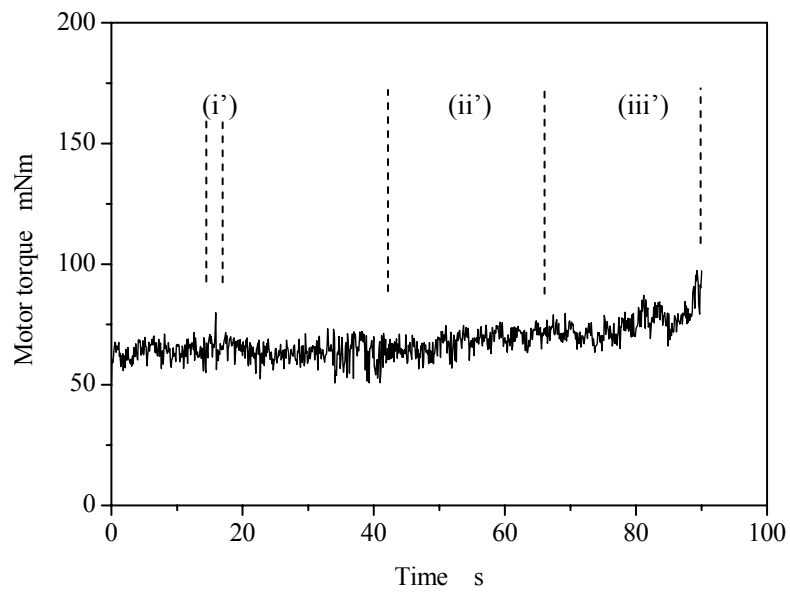


Fig. 7.4 Motor torque in the case of vertical pattern

7.4 極細径管用ロボットの走行試験

7.4.1 設計仕様

原子力発電プラントのドレン用配管には1インチ以下のものが使用されている。1インチ以下の極細径配管内を移動するロボットの研究は各所で行われているが、移動速度が低く実用化には到っていない。また、車輪方式の研究はほとんど行われていないのが現状である。そこで、遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いて極細径管内を移動するロボットを設計製作し、その走行試験を行う。

極細径管用ロボットの設計にあたっては、以下に示す仕様を満足させる。

- (1) 適用管内径は20mm以下とする。
- (2) 垂直管や曲管内を走行できること。
- (3) ケーブル類を連結しても牽引できること。

ロボットの基本構成は第2章で示した図2.4(b)の車輪走行機構を前後に用いた構造とした。車輪走行機構には図2.5に示す駆動用アクチュエータと車輪走行機構を一体化させた機構を用い、フレキシブルカップリングにはFMAを採用した。図7.5に極細径管用管内移動ロボットの断面図を示す。大きさは直径19mm、長さ80mmである。車輪走行機構の前後輪の車輪列はそれぞれ3組とし、管内径20mmの管内に適用できるものとした。

図7.6に極細径管用管内移動ロボットのシステム構成を示す。制御装置はロボット動作を制御するモータドライバとFMAを動作させる電磁弁で構成されている。ロボット本体には超小型ブラシレスDCモータとFMAを装備し、ロボット本体と制御装置はケーブルで接続されている。ケーブルはモータ用の電線とFMAのエアチューブで構成されている。ロボットの操作はオペレータが操作ボックスを手動操作する。操作はロボットの前・後進、停止とFMAのステアリング動作である。

7.4.2 設計・試作

極細径管用管内移動ロボットの車輪走行機構の断面図を図7.7に示す。機構が小型化されるとそれを駆動させるモータのトルクも小さくなることから、車輪走行機構での動力損失が小さくなるような設計が必要である。そこで、ウォームとかみあう太陽歯車および遊星歯車は、第3章3.3節で述べた歯車の動力伝達効率を考慮して伝達効率の良いはすば歯車を使用した。はすば歯車のねじれ角はウォームの進み角と同じ角度とした。はすば歯車を用いることで回転軸にスラスト方向の力が発生するが、小径の歯車であるため軸受を大きくする必要はなかった。

車輪走行機構における動力源はロボットの走行性能を満足させる高出力なアクチュエータが要求される。このアクチュエータについては第6章6.2節で述べた小型軽量、構造がシンプル、制御が容易な超小型の3K型不思議遊星歯車減速機と超小型ブラシレスDCモータを用いた。車輪走行機構は超小型ブラシレスDCモータの出力軸に3K型不思議遊星歯車減速機とウォームを直結させた構造になっている。超小型ブラシレスDCモータは高効率、高トルク化を実現するために第6章6.3節で示した結果を考慮して、磁数とコイル数は4極6コイルとした。ステータヨークを兼用するモータケースの内側に薄形の空心コイルを配置し、その内側で軸受に支持された希土類磁石からなるロータが回転する構造である。スペース節約のため、ブラシおよびロータ位置を検出する位置センサを省いた構成した。超小型ブラシ

レス DC モータの大きさは外径 5mm, 長さ 8mm である。ロータは 4 極に着磁された希土類磁石(SmCo)で軸に接着固定されている。ステータは絶縁と配線を兼ねたフレキシブル基板に 6 個のコイルが等配に固定され, モータケースの内側に円筒状となるように成形されている。図 7.8 に試作した超小型ブラシレス DC モータの外観写真とコイルアセンブリの写真を示す。コイルは直径 0.06mm の銅線を 35 ターン巻いた空芯コイルとした。超小型ブラシレス DC モータの出力特性は, ブラシレス駆動させた場合の無負荷回転数, 無負荷電流, 直流抵抗を測定し, 直流モータの計算式⁽⁶²⁾より算出した。コイル印加電圧が 4V の場合に始動トルクは 0.17mNm, 最大出力は 0.214W であり, 最大効率は 22%の値を得た。この特性は外径 5mm の 2 極 3 コイル構造のブラシレス DC モータと比較して各項目とも 2 倍の値であり, 磁数とコイル数は 4 極 6 コイルとしたことで高トルク, 高出力化が実現できた。ロボットでは低速域から高速域までブラシレス DC モータを安定して駆動させる必要があるために, ブラシレス DC モータの駆動方式はシンクロナス駆動を適用した。

図 7.7 に示した超小型の 3K 型不思議遊星歯車減速機を構成する歯車 a, b, c, d はモジュール 0.05mm で歯数はそれぞれ 12, 29, 69, 72 である。図 7.9 に試作した超小型 3K 型不思議遊星歯車減速機の外観写真を示す。減速比は 1/162 であり, モータ軸の回転は 1/1620 に減速されて車輪に伝達される。

試作した超小型アクチュエータの出力特性を得るために実験を行った。図 7.7 に示したアクチュエータの形状では出力軸がウォームであるために測定が困難であることから, 図 7.10 に示すようにブラシレス DC モータと 3K 型不思議遊星歯車減速機を一体化したアクチュエータを設計試作した。リード線側がブラシレス DC モータで出力軸側が 3K 型不思議遊星歯車減速機であるこのアクチュエータのサイズは外径 5mm で, 長さ 15mm である。外径 5mm のブラシレス DC モータと 3K 型不思議遊星歯車減速機を一体化したアクチュエータの出力特性を図 7.11 に示す。図 7.11(a)はアクチュエータの出力トルクに対する回転数と電流の関係を示したもので, 両者は線形関係にある。最大出力トルクは 4.65mNm である。このとき減速機の入力回転数は 14580rpm, 出力軸回転数は 90rpm である。トルク定数は 36.4mNm/A で, 始動トルクの推定値は 7mNm である。3K 型不思議遊星歯車減速機の効率試験結果を図 7.11(b)に示す。減速効率は低トルク域では低く, 高トルクほど高くなり, 一定値に収束される傾向がある。最大出力トルク 4.65mNm の時, 減速効率 30%が得られた。

次に, 極細径管用管内移動ロボットの設計を行う。車輪走行機構のウォームと太陽歯車間の速比, 太陽歯車と遊星歯車間の速比は, それぞれ $u_p=1/30$, $u_G=3$ とした。車輪は外径が 3.3mm, 幅が 1.3mm のゴム製とした。前後の車輪走行機構は同じ構造のものを使用する。この前後の車輪走行機構を連結する部材に FMA を用いた。FMA は内部が 3 つの圧力室に分かれた繊維強化ゴム製の流体アクチュエータで, 図 7.12 にその構造を示す。外壁には周方向に繊維が埋め込まれており, z 方向には伸縮しやすく, 半径方向には変形しにくい異方性弾性を与えている。3 室の圧力を等しくすると z 方向に伸縮し, 圧力間に差を与えると任意の方向へ湾曲する。湾曲方向, 曲率, 伸張量は圧力室の圧力の組み合わせによって決まり, 計 3 自由度の動作が行えるため, FMA は分岐管や T 字管の通過を行うためのステアリング用に使用することが可能である。極細径管用管内移動ロボットでは外径 8mm, 長さ 40mm の FMA を試作しそれを用いた。

図 7.13 に試作した極細径管用管内移動ロボット⁽⁶³⁾の外観写真を示す。試作した極細径管用管内移動ロボットを内径 20mm の透明アクリル製パイプを用いて走行実験を行った。実験の結果, 水平管, 垂直管および管中心の曲率半径 60mm のエルボ管の通過が手動操作で

可能であった。曲管通過時は FMA が曲管にならって湾曲することで曲管の通過が可能であった。極細径管の実験での曲管の曲率半径と管内半径から決まる定数は $K_B=1.16$ である。水平直管での計測で最大移動速度 4.2mm/s, 最大牽引力 1.8 N の性能を得た。

以上の実験結果から、7.4.1 項で述べた設計仕様をすべて満たしていることが検証できた。

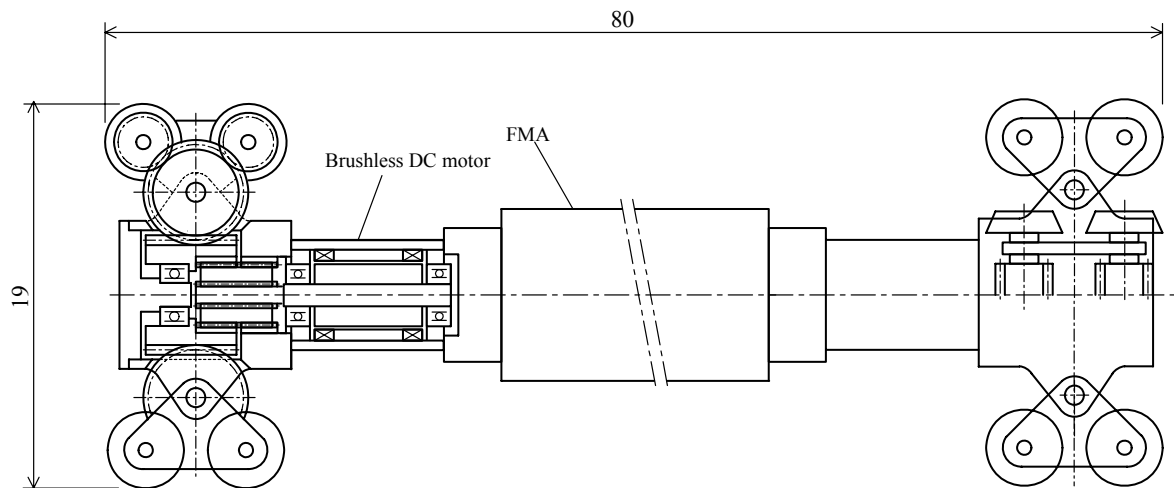


Fig. 7.5 Cross-sectional view of in-pipe mobile robot for small pipes

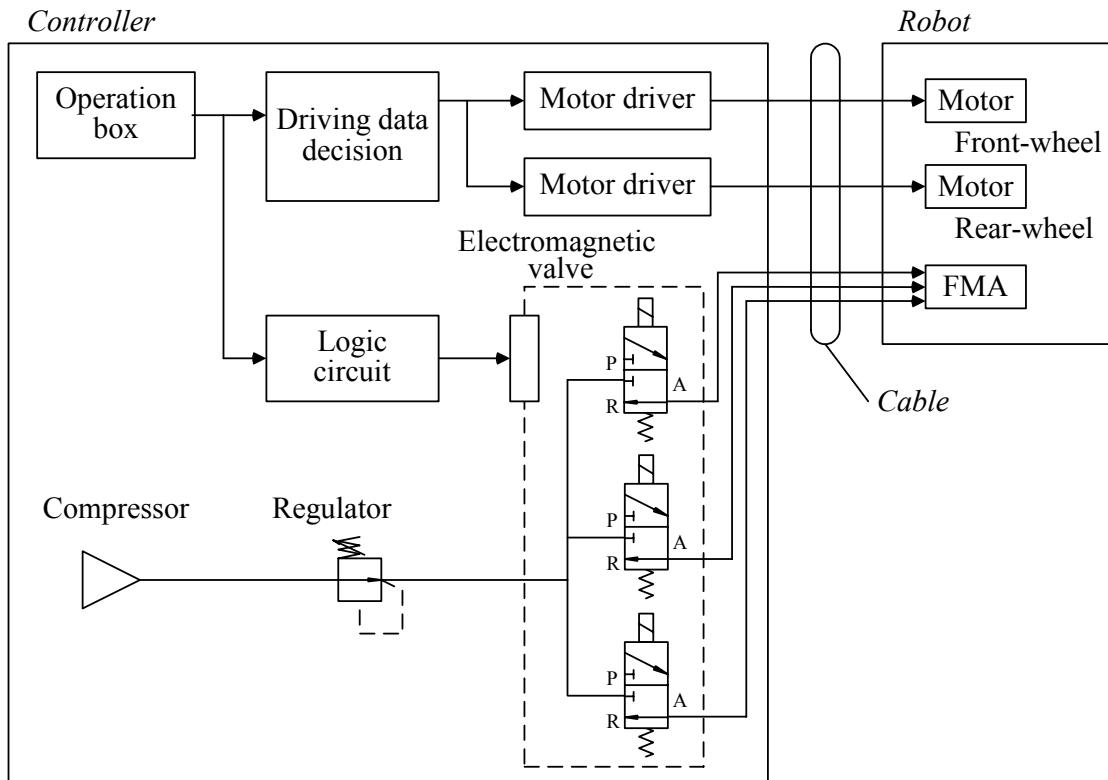


Fig.7.6 Configuration of control system for small pipes

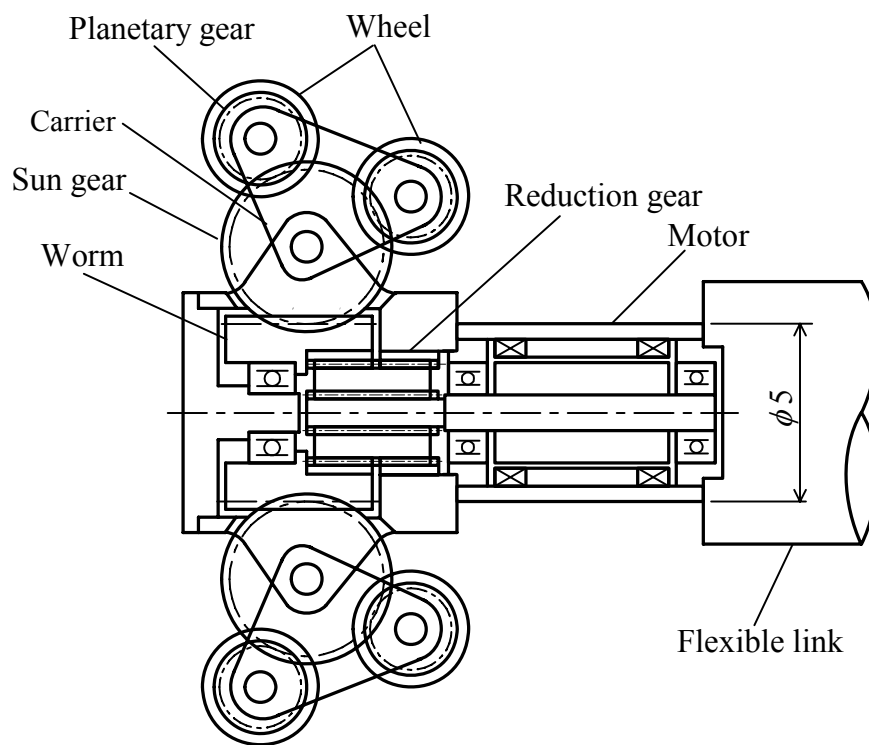


Fig.7.7 Cross-sectional view of the wheel drive mechanism for small pipes

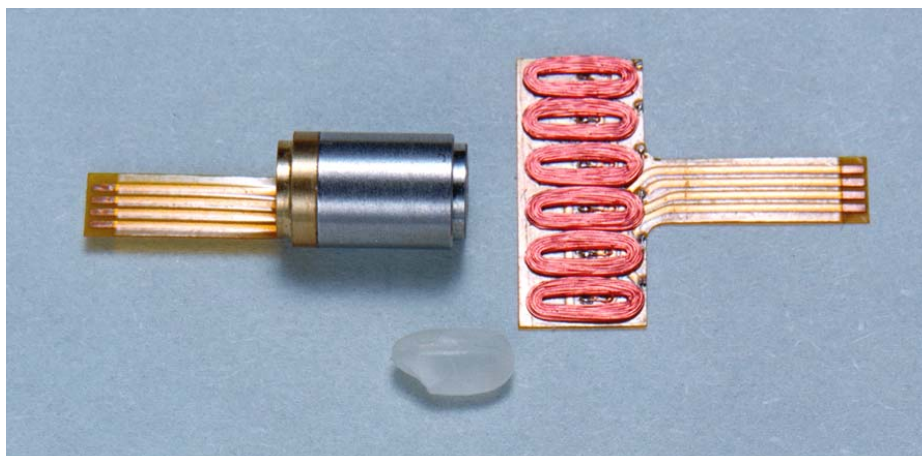


Fig.7.8 Photograph of the micromotor ($\phi 5$ mm)

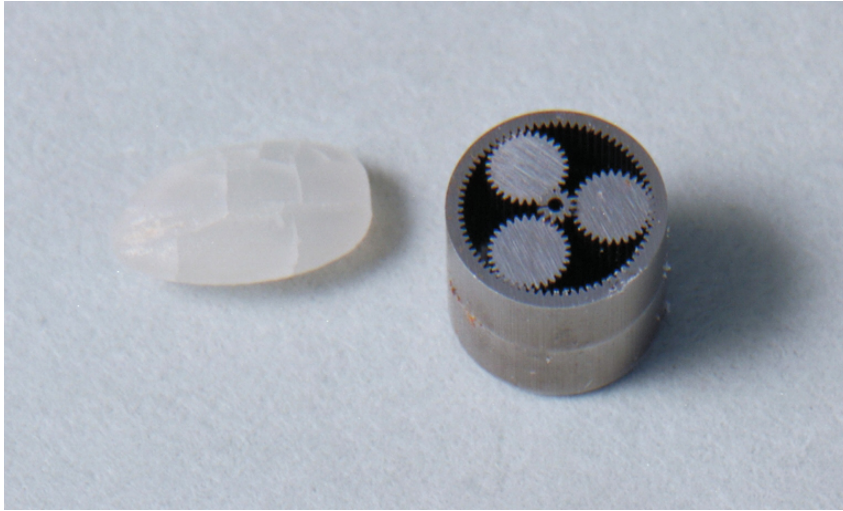
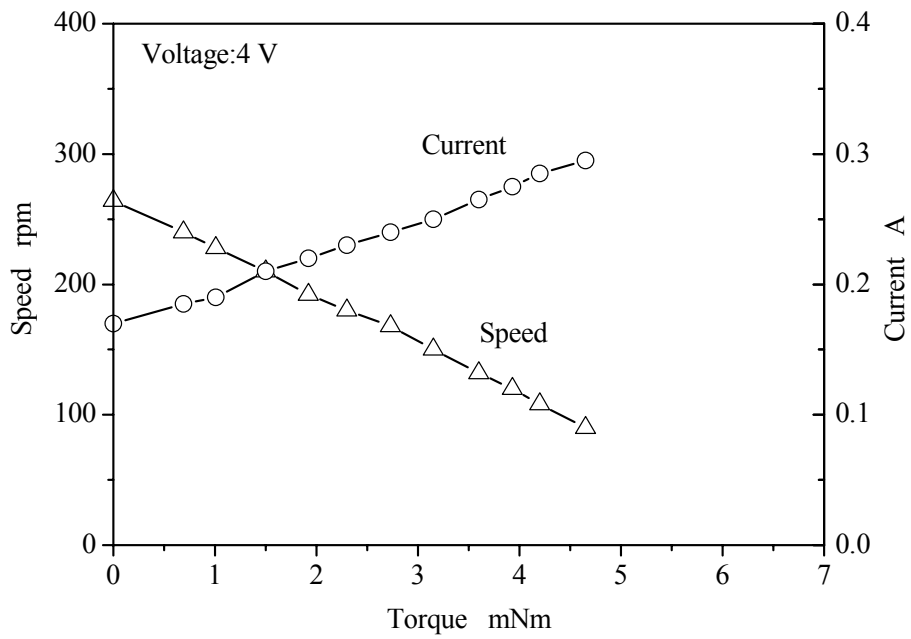


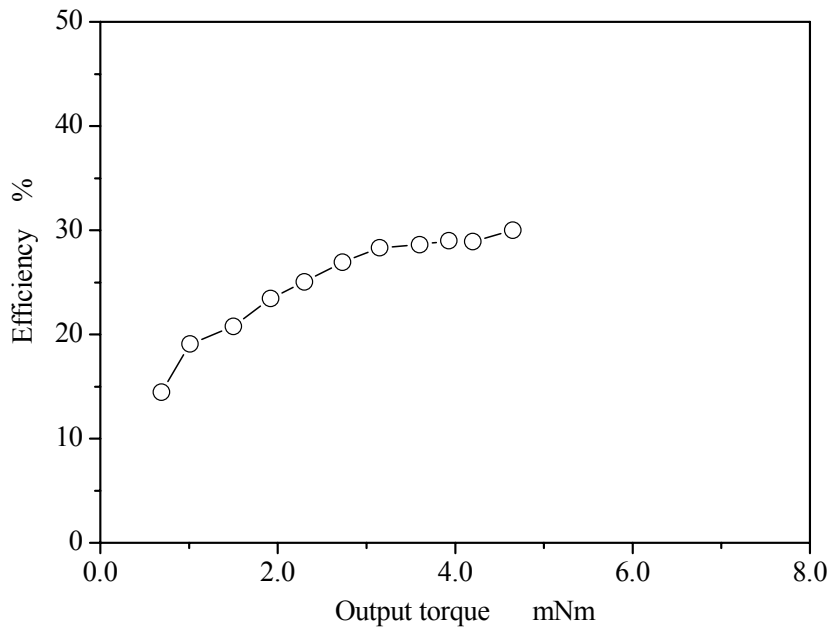
Fig.7.9 Photograph of the micro reduction gear (ϕ 5 mm)



Fig.7.10 Photograph of the microactuator and micromotor



(a) Relations between torque and speed, and between torque and current of the microactuator



(b) Relation between torque and efficiency of the micro reduction gear

Fig.7.11 Characteristics of the microactuator ($\phi 5$ mm)

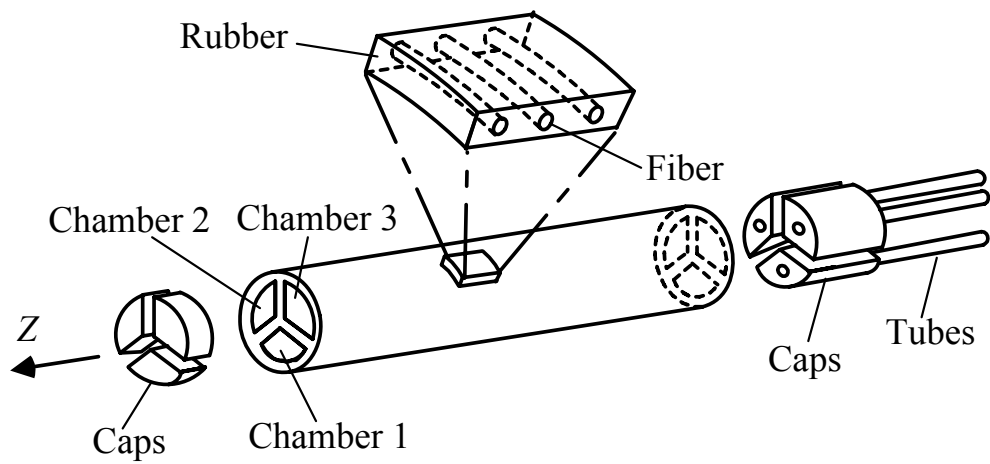
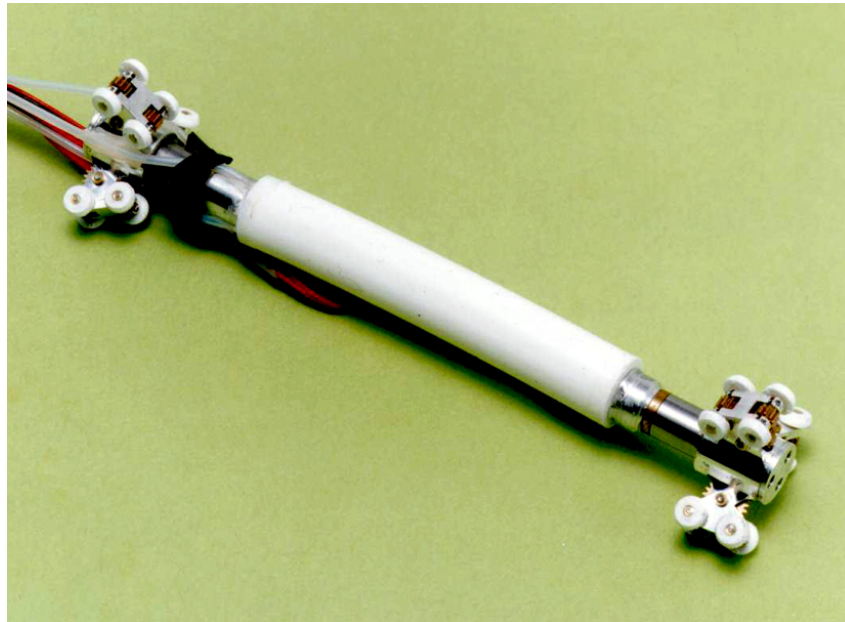
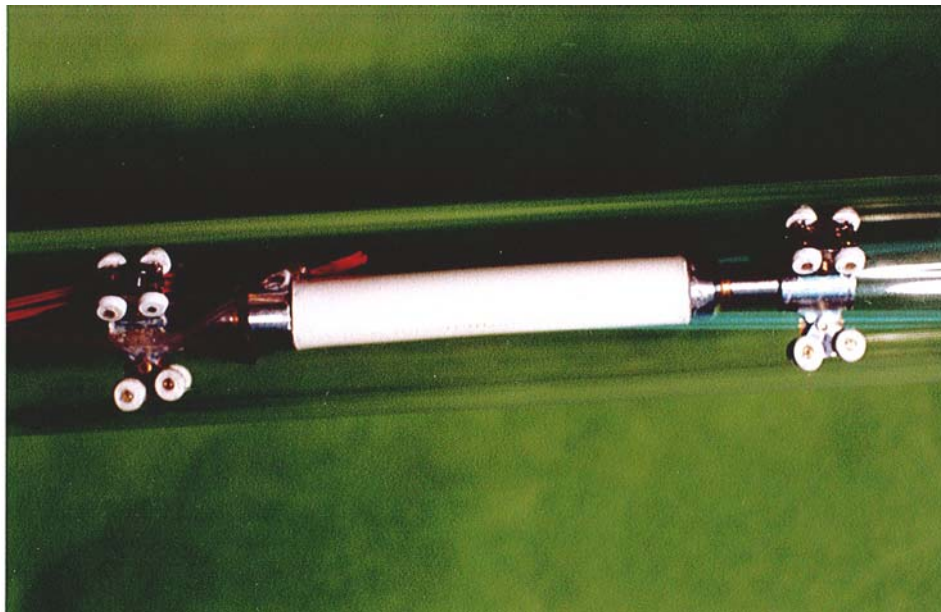


Fig. 7.12 Structure of the flexible microactuator



(a) Photograph of outline



(b) Locomotion moving of pipes

Fig. 7.13 Photograph of in-pipe mobile robot for small pipes

7.5 1インチ管における検査・異物回収ロボット

7.5.1 設計仕様と全体構成

1インチ管用の管内移動作業ロボットは管内径が1インチの配管内部を自走でき、管内壁の目視検査と異物の回収を実現させることを目指した。このロボットの開発にあたっては、以下に示す仕様を満足するように設計を行った。

- (1) ロボットは観察機構と異物回収機構を備え、1インチ管の内部を自走しながら配管内の目視点検や異物回収の作業ができる構造とする。
- (2) 観察機構は配管内面の状態が観察でき、管壁の傷や腐食を目視で認識できる小型カメラとする。
- (3) 回収機構は管内の異物（大きさが3mm程度）を挟み持ち上げることできるハンドとする。
- (4) 垂直管および2つ以上ある曲管部を有する配管内を通過できるものとする。

上記仕様を満足させるロボットの設計は第2章で示した図2.4(b)を基本構成として行った。設計した1インチ管用の管内移動作業ロボット⁽⁴⁹⁾の構成を図7.14に示す。ロボットは前後に遊星歯車式管径追従車輪走行機構を装備した移動機構の先端にマイクロカメラとマイクロハンドが搭載されている。大きさは直径23mm、長さ110mmで、質量は16gである。車輪走行機構はゴム製チューブ（フレキシブルカップリング）の前後に装着され、前輪側の車輪列は2組、後輪側は3組となっている。カメラは小型で高分解の映像が得られるCCDカラーカメラ⁽⁶⁰⁾を用い、ハンドはコンパクトで多自由度の動作が可能なFMAを用いる。カメラとハンドの微妙な位置合わせを行うための作業部回転機構を設け、扁平形状の空圧ワブルモータ⁽⁶¹⁾を用いて構成する。図7.15に1インチ管用の管内移動作業ロボットのシステム構成を示す。制御装置は、ロボットの動作を制御するモータドライバとハンドおよびワブルモータを動作させる電磁弁などで構成されている。ロボット本体には、超小型ブラシレスDCモータ（M）、FMA（A）、ワブルモータ（W_M）とCCDカメラなどを搭載し、ロボット本体と制御装置はケーブルで接続されている。ケーブルはCCDカメラ用の電線、モータ用の電線およびハンド・ワブルモータ用のエアチューブから構成されている。ロボットの操作はオペレータが搭載したカメラ映像を見ながら操作ボックスで行う。操作ボックスでは、ロボットの前・後進、停止とハンドの各種動作、カメラとハンドを搭載した作業部の回転を操作できる。

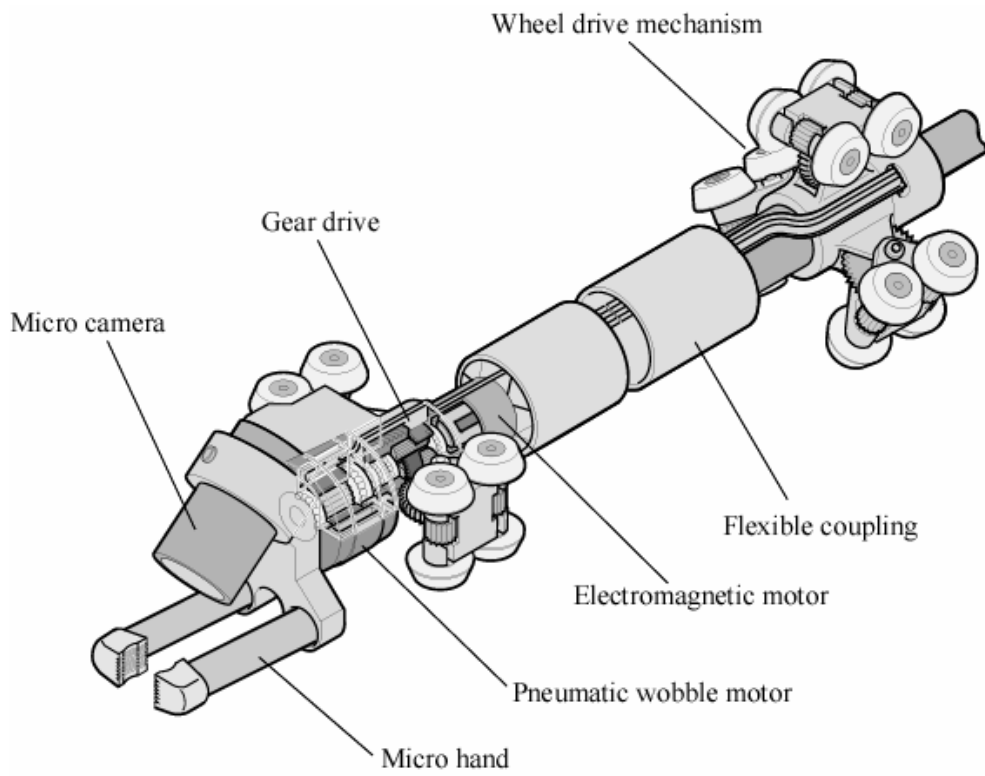


Fig. 7.14 Configuration of in-pipe mobile robot for 1-inch pipes

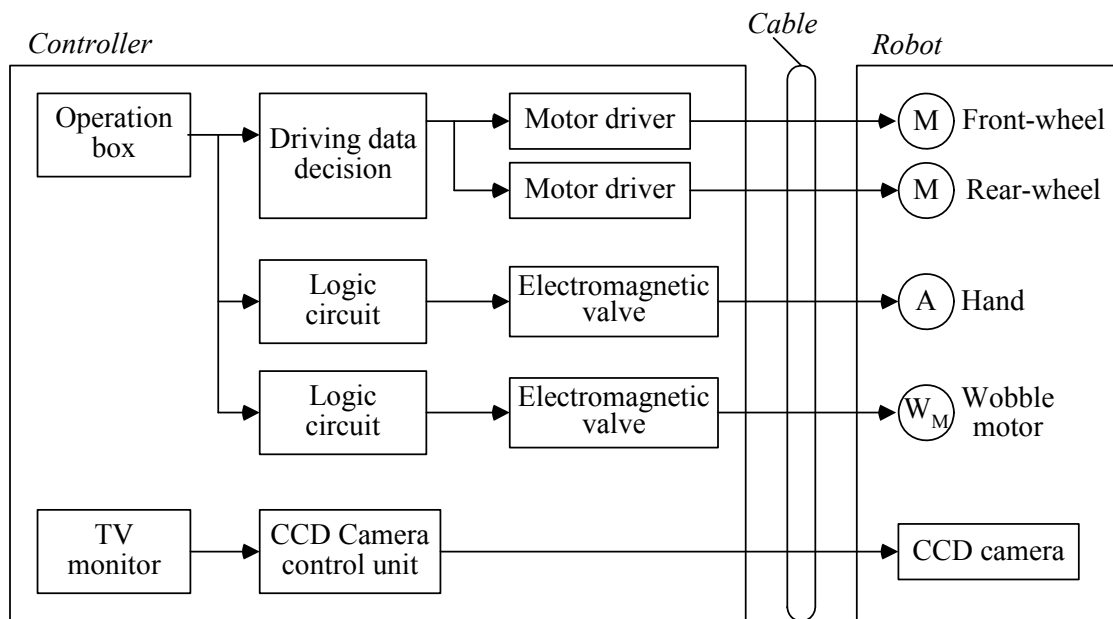


Fig. 7.15 Configuration of control system for 1-inch pipes

7.5.2 設計・試作

(a) 車輪走行機構

1インチ管用の検査・異物回収ロボットの車輪走行機構は図 7.7 に示す構成と同じで、車輪径のみを大きくしたものである。1インチ管用の車輪走行機構のウォームと太陽歯車間の速比、太陽歯車と遊星歯車間の速比は、それぞれ $u_p=1/30$ 、 $u_G=3$ であり、ブラシレス DC モータの回転は 1/1620 に減速されて車輪に伝達される。車輪は円錐形状とし、幅が 1.7mm で幅方向の中心での外径が 4.6mm のゴム製とした。1インチ用車輪走行機構の外観写真を図 2.7 に示している。

(b) フレキシブルカップリング

フレキシブルカップリングは薄肉構造のゴム製チューブから構成されている。エルボ管のような曲がった配管を通過するときは、フレキシブルカップリングが管形状に沿って変形して曲管を通過する。このフレキシブルカップリングの内部にはカメラやハンドのケーブル類が挿通されている。そして、フレキシブルカップリングの中心軸は車輪走行機構の中心軸と一致するように取り付けられている。

7.5.3 検査・異物回収機構

(a) マイクロカメラ

ロボット先端部に装着したマイクロカメラは、配管内面の傷や腐食の目視検査に要求される高画質を得るために、1/4インチ総画素数 41 万画素の CCD カラーカメラを搭載している。図 7.16 に CCD カメラヘッド部の外観写真を示す。カメラヘッド部の大きさは直径 7mm、長さ 12mm で、質量は 1.2g である。マイクロカメラは、カメラヘッド部とカメラ制御部とをカメラケーブルで接続する、カメラヘッド分離型構造となっている。カメラヘッド部は、撮像レンズ・光学ガラス・CCD・出力回路で構成され、カメラケーブルにより CCD を駆動する水平駆動パルス・垂直駆動パルス・CCD 出力信号・電源等を得ている。カメラケーブルは、直径 2.8mm の 12 芯極細シールド線を用いている。また、カメラ制御部では CCD からの信号をデジタル信号処理する回路、CCD の露光時間を自動制御する電子アイリス機能、自動白バランス機能等を持ち、水平解像度 470TV 本・垂直解像度 350TV 本の高精細な TV 画像を得ている。表 7.1 にマイクロカメラの主な仕様、使用したレンズの仕様を示す。

図 7.17 に CCD マイクロカメラの断面図を示す。カメラヘッド部は小型細径化するために TOG (TAB On Glass) 実装⁽⁶⁰⁾を用いて構成した。従来の CCD 撮像素子は、セラミックパッケージ内に収納し、ワイヤボンディングにより配線しカバーガラスを付け封止していた。これをマイクロカメラに用いると、パッケージの大きさでカメラヘッド形状が決まり小型化が難しい。TOG 実装は、CCD チップをそのまま基板に実装するため CCD チップサイズとほぼ同等のパッケージ外形を実現することができる。TOG 実装の構成部品は、CCD の画素ピッチとレンズから入る光線の空間周波数成分との折り返し歪みを避けるための光学フィルタ、TAB (Tape Automated Bonding) 基板および CCD チップである。光学フィルタはカラー画像を得るために不要な 700nm 以上の波長をカットする近赤外カットフィルタが蒸着されている。図 7.17 に示すように外径 6.4mm、厚み 1.6mm の撮像部が得られ、マイクロカメラの外径を 7mm にすることができた。CCD 信号出力部は、フレキシブル基板を用い、撮像部と熱圧着により接合し、カメラケーブルをフレキシブル基板に直接ハンダ付けすることで信

号出力部をコンパクトにし、カメラヘッドの小型化を実現した。

(b) マイクロハンド

管内における異物の回収や堆積物のサンプリングにおいて、汎用性の高いハンドが要求されることが多い。このような作業を行うには、コンパクトな構造の多自由度のハンドが必要であり、空気圧で駆動される FMA を用いた。FMA は繊維とゴムの複合材料からできた空気圧アクチュエータで、内部の 3 つの圧力室の内圧制御により任意方向への湾曲と長手方向への伸縮の、計 3 自由度の動作ができる⁽³⁹⁾。

1 インチ管用の管内移動作業ロボットには、直径 3mm、長さ 15mm の FMA を図 7.18 に示すように、2 本用いてハンドを構成した。圧力調整には、それぞれの圧力室ごとに、外径 0.5mm、内径 0.2mm、長さ 1.5mm の送気チューブ（テフロンチューブ）を通じて、電磁弁によるオンオフ制御を適用した。通常最も良く使うハンド姿勢として、図 7.18 に示すように、5 つのモード（Normal, Up, Down, Open, Grasp）を設定し、それぞれ、表 7.2 に示すような駆動パターンで各圧力制御弁を駆動している。また、連続動作モードとして、Pick-up, Place の 2 モードを設定し、ボタン一つで、拾い上げ、置き動作を実行できる。一方、FMA は軸方向への伸縮動作が可能であるが、今回は挟み持ち上げる動作を主に設定しているため、ハンドを伸縮させるモードの設定は行っていない。

この 2 指 6 自由度ハンドにより、管壁上にある大きさ 1~4mm、質量 1~3g の対象物を拾い上げ、回収することができる。動作速度はステップ応答で時定数約 0.5s である。また、この FMA を用いたハンドは、1)耐水、耐塵構造である、2)柔軟で対象物への形状適応性があるので、色々な形や柔らかさの物体に対して安定した把握ができる、3)軽量、といった、管内移動作業ロボットへの搭載に適した特長を持つ。

(c) 作業部回転機構

管内で目視点検を行いながら異物などの回収作業を行うには、作業部の微妙な位置合わせが必要である。そこでカメラとハンドを搭載した台座を管軸回りに回転させるために、空圧ワブルモータ⁽⁶¹⁾を搭載した。空圧ワブルモータは低速ではあるが扁平構造で小型・高トルクが発生できる回転形モータで作業部の位置合わせ機能に適している。一般にマイクロロボットでは、ロボットを構成する各部品の小型化に比べて電線やエアチューブの細径化は容易でなく、これらケーブル類の剛性によるアクチュエータへの負荷は過大になりがちである。1 インチ管用の管内移動作業ロボットにおいても、ハンドとカメラにつながるチューブやケーブルの剛性は高く、従来のブラシレス DC モータを用いたのでは、減速機のスペースが大きく、扁平形状が要求される 1 インチ管用ロボットの設計には適用できない。そこで、差動歯車減速機を利用した空圧ワブルモータを用いることにした。図 7.19 にワブルモータの動作原理を示す。円筒状部材 A とこれよりもやや小さい円筒状部材 B が転がり接触をして相対運動を行うモータであり、A と B の固定の仕方によって出力形式が決まる。A を固定すると B が回転（自転と公転を伴う）する転動型インナーロータ形となる。空圧ワブルモータは部材 B を回転支持したもので自転成分のみをもつモータである。

図 7.20 に試作した空圧ワブルモータ⁽⁶¹⁾の断面図を示す。空圧ワブルモータは基本部品として、ゴム製のワブルジェネレータ、内歯車をもつワブルリング、外歯車を有するロータから構成される。図 7.20 におけるロータとワブルリングが、図 7.19 における部材 B と部材 A にそれぞれ相当する。ワブルリングの内径はロータの外径よりやや大きく、ロータとワブル

リングの内側がかみあう差動歯車減速機構にすることで、ロータが自転する。ワブルジェネレータはゴム製のドーナツ形の部材で、内部に複数の圧力室が形成されている。この空気室を順次加圧していくと、加圧された空気室の部分が膨張してワブルリングがロータの周囲をかみあいながら振れ回り運動（公転）する。ワブルリングが1回転すると、差動歯車減速機構の原理により、減速比に相当する分だけロータが回転する。ワブルリングの公転速度 ω_{WR} とロータの自転速度 ω_{RT} の間には次の関係が成り立つ。

$$\frac{\omega_{RT}}{\omega_{WR}} = \frac{z_{RT} - z_{WR}}{z_{RT}} \quad (7.1)$$

ただし、 z_{RT} 、 z_{WR} はそれぞれロータ、ワブルリングの歯数を示す。したがって、 z_{RT} 、 z_{WR} の歯数差を小さくするほど減速比を大きくすることができる。試作したものはワブルリングとロータの歯数差を1とし、 $z_{RT}=35$ 、 $z_{WR}=36$ の歯車（モジュール0.1mm）とした。この歯車の歯形は、低歯のインボリュート歯形を基本にし、インボリュート干渉を避けるために、その歯先と歯底を円弧としたものである⁽⁶¹⁾。これにより、両歯車のかみあいがピッチ点を含み、同時にかみあい率を1とすることができ、高効率のかみあいが実現できる。ロボットに搭載した空圧ワブルモータの速比は-1/35であり、ワブルリングを35回転させると、ロータは反対方向に1回転自転する。回転動作における摩擦損失がないとすれば、ワブルリングのトルクは35倍に拡大されて出力軸に伝わることになる。このように空圧ワブルモータは、低速、高トルクを特徴としている。

図7.21に試作した空圧ワブルモータの分解写真、図7.22にワブルジェネレータの外観写真を示す。空圧ワブルモータのサイズは直径9.4mm、長さ6mmで、重さは0.9gである。図7.23に空圧ワブルモータの圧力制御装置、表7.3に圧力室の加圧シーケンスを示す。圧力制御には電磁弁のON-OFF制御を用いており、表7.3中、ONは加圧状態をOFFは大気圧への開放状態を示している。駆動シーケンスは、加圧する圧力室数を一定のまま、順に加圧パターンを1部屋ずつシフトしていく方式で、加圧する圧力室数は2とした。実験の結果、空気圧0.4MPaで、最大速度20rpm、最大トルク7mNmであった。この発生トルクは同サイズの電磁モータに比べて10倍以上大きな値である。ワブルリングの公転分解能は6step/rev.であるため、出力軸は210step/rev.の分解能をもつステッピング動作が実現できる。1インチ管用ロボットでは動作範囲を $\pm 30^\circ$ に設定しており、動作範囲の制限も可能である。

Table 7.1 Micro camera and lens specifications

Size	$\phi 7.0 \times 12$ mm
Mass	1.2 g
CCD	1/4 inch, 410,000 pixels
Video output	NTSC system
Resolution	More than 470 lines(H),
	More than 350 lines(V)
Standard intensity	400 lx (F2.5, 3000K)
Lens	f3.4mm
	F5.6
	Picture angle 56.4° (H), 41.5° (V)
Power	DC 12V, 5W

Table 7.2 Microhand drive pattern

	Valve 1	Valve 2	Valve 3	Valve 4	Valve 5	Valve 6
Normal	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Up	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
Down	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON
Open	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF
Grasp	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON
Pick-up	Normal → Open → Down → Grasp → Up					
Place	Up → Grasp → Open → Normal					

Table 7.3 Pneumatic wobble motor drive pattern

	valve 1	valve 2	valve 3	valve 4	valve 5	valve 6
step 1	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
step 2	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
step 3	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
step 4	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
step 5	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
step 6	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON



Fig.7.16 Photograph of the CCD microcamera head

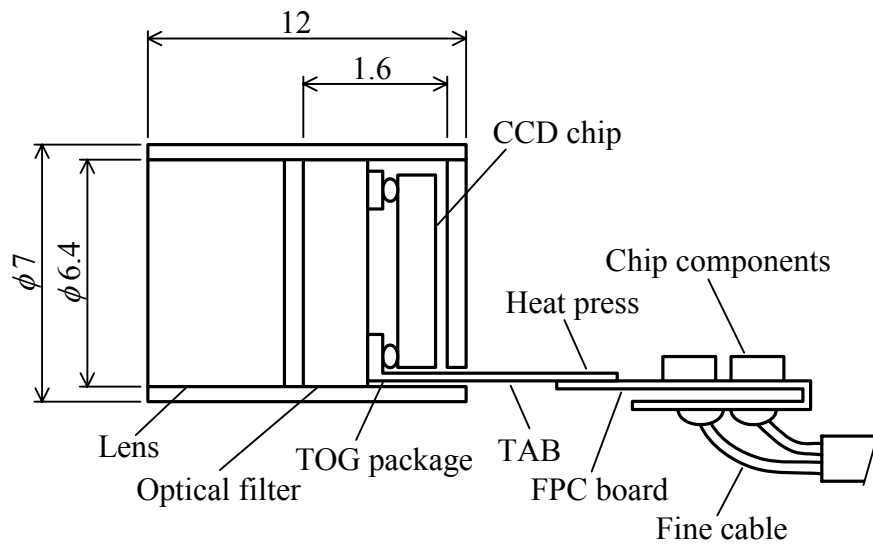


Fig.7.17 Cross-sectional view of CCD microcamera

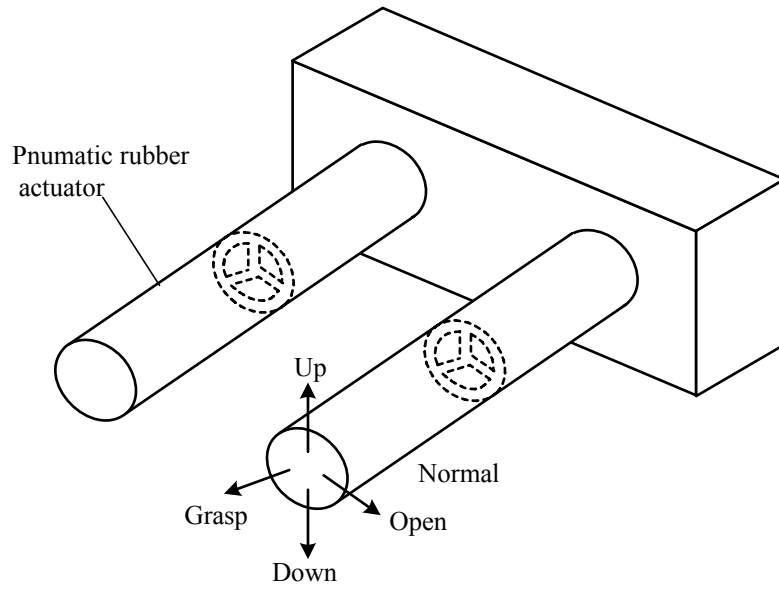


Fig. 7.18 Configuration of FMA microhand

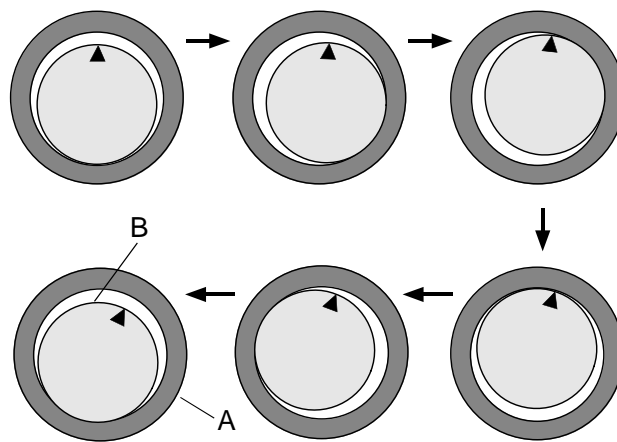


Fig. 7.19 Driving principle of wobble motors

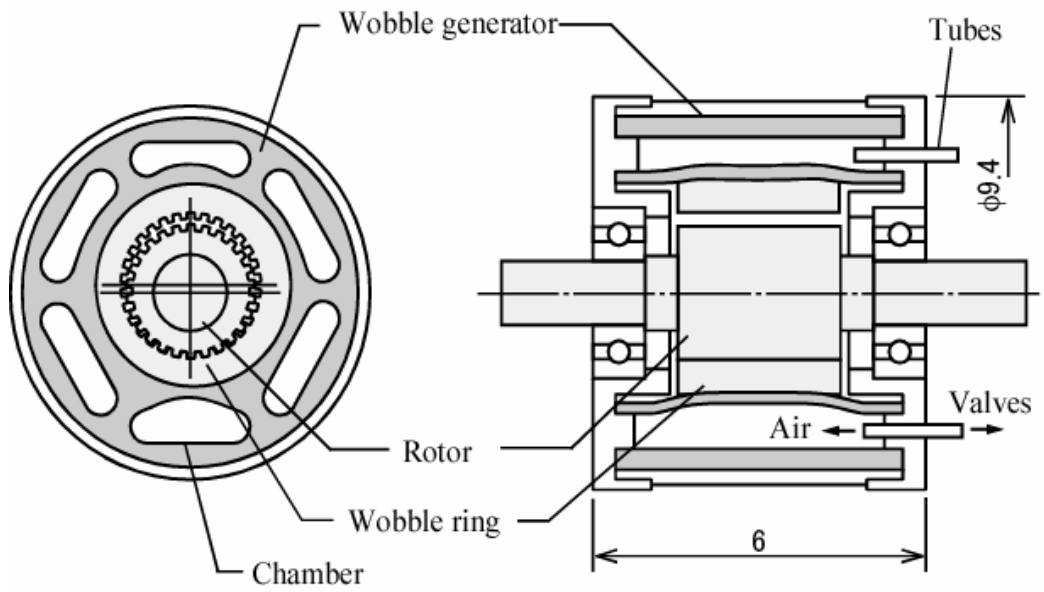


Fig. 7.20 Cross-sectional view of pneumatic wobble motor

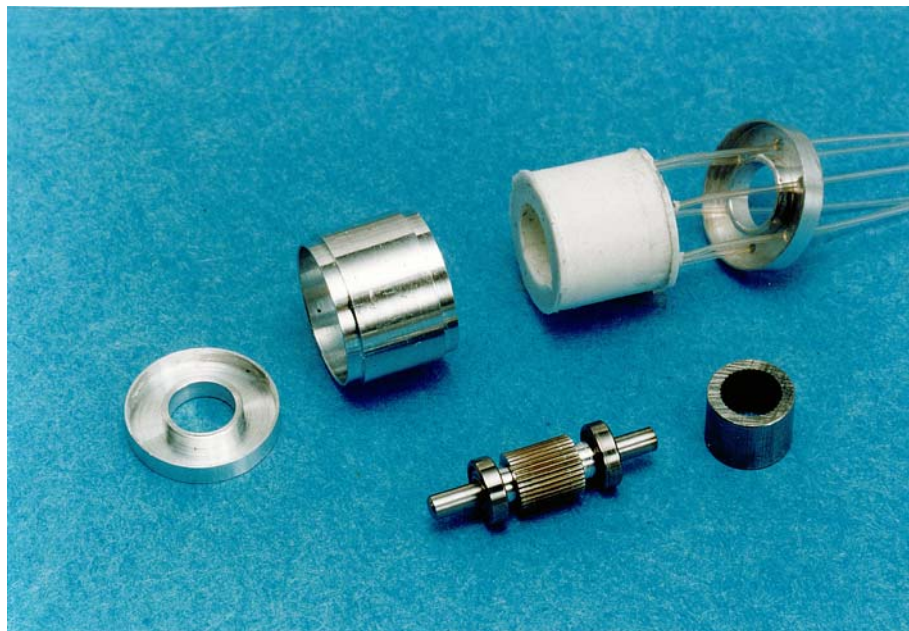


Fig.7.21 Parts of the pneumatic wobble motor



Fig.7.22 Photograph of the wobble generator

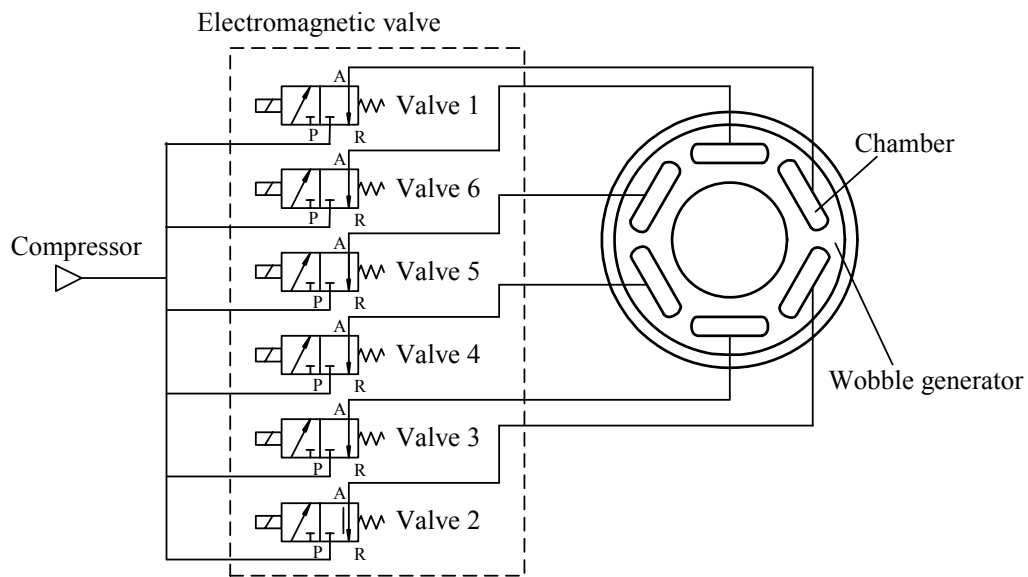


Fig. 7.23 Control system of pneumatic wobble motor

7.5.4 1インチ管用検査回収ロボットの走行試験

試作したロボットを内径 24mm の透明アクリル製パイプを用いて基本動作の実験を行った。図 7.24 に示すように配管は 2 箇所エルボ（管中心の曲率が 120mm, 150mm）を有し、管内壁は汚れのないきれいな状態のものである。実験はこの配管を垂直状態に設置して行った。その結果、図中の A 点からスタートし垂直管と 2 箇所エルボ管を通過して図中の B 点まで走行することができた。水平直管での計測で、最大移動速度 6mm/s, 最大牽引力 1N の性能を得た。図 7.25 に曲率半径 120mm のエルボ管通過の様子を示す。エルボ管通過では車輪の移動量が車輪間で異なるように車輪の変形やスリップが生じて、車輪同士の移動量に差をつけている。曲管の曲率半径と管内半径から決まる定数は第 4 章の式(4.13)から、 $K_B=1.1$ である。また、垂直管の上昇から降下に方向を切り替える時は、前後の車輪が同時に切り替えを行うと落下してしまうので、前後の車輪のどちらか一方が管壁に接触しているように切り替えるタイミングを変えることで落下しないようにしている。

搭載した CCD カメラは直径 0.025mm のタングステンワイヤを認識することができ、目視点検に必要な性能が十分得られている。図 7.26 は空圧ワブルモータ回転前と回転後のカメラ映像である。空圧ワブルモータを回転することで管壁の半周程度までの目視点検が可能であった。異物を模擬した 3mm 角の対象物に対して、カメラ映像を見ながらハンド、空圧ワブルモータのマニュアル操作で拾い上げ、回収させることが容易に可能であった。また、拾い上げ時のハンドと対象物との位置合わせもスムーズに行うことができた。図 7.27 に 3mm 角の対象物を拾い上げ、回収する 1 インチ用ロボットの様子を示す。なお、管軸に対してロボットが大きく回転しまうと作業部位への位置決めができなくなってしまう。これに関してはねじれ動作が可能な FMA を用いた設計を行えばロボットを管軸に対して回すことが可能となる。

以上の結果は、7.5.1 項で述べた設計仕様をすべて満たしている。

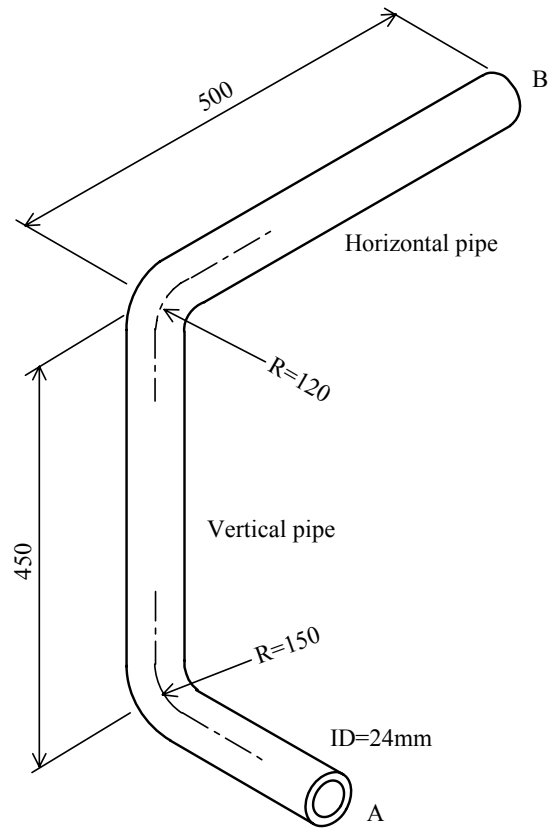


Fig.7.24 Configuration of test pipe for 1-inch pipes



Fig.7.25 Locomotion through a vertical elbow-joint



a) Rotation of wobble motor: 0 degree



(b) 30 degree

Fig. 7.26 TV image from microcamera mounted on robot for 1-inch pipes



Fig.7.27 Collection of the small object in 1-inch pipes

7.6 配管内部放射能汚染測定ロボット

7.6.1 設計仕様と全体構成

原子炉施設内には、コンクリート構造物に埋設された配管が多数存在する。この施設を廃止措置する場合、配管内部の放射線量やその分布を測定して、施設内の放射能に関する情報を把握しておくことは非常に重要であり、配管内部の汚染分布を直接測定する装置⁽⁴⁾、⁽⁵⁾の実現が望まれている。そこで管内移動ロボットに放射能を検出する小型検出器を連結して、配管内部を自動走行しながら汚染分布を直接測定できる配管内部汚染分布測定ロボット⁽⁵⁰⁾、⁽⁵¹⁾を開発する。

このロボットシステムの開発にあたっては、以下に示す仕様を満足するように設計を行った。

- (1) 配管は規格 Sch40 の 3 インチ配管とし、配管の長さは 15m とする。そして、配管の形状は T 字管および 2 つの 90°エルボ（ショートおよびロング）が存在するものとする。
- (2) 使用環境は、放射線レベル 30～50 μ Sv/h、温度 0～40°C、湿度 80%RH とする。
- (3) 管内の走行性能として、自走式であること。ただし、動力や映像信号は外部から有線で供給する。ロボットは移動速度が可変でき、以下の項目を満足させること。
 - ・配管内部に存在する溶接箇所のビート等の凸部を走行できること。
 - ・水平、垂直面内の 90° エルボ（ショートおよびロング）を通過できること。
 - ・水平、垂直面内の T 字管を通過できること。
 - ・ケーブル類および検出部等を連結しても牽引できること。
 - ・直管部において自動運転制御が行えること。
- (4) ロボットの操作性として、操作ボックスおよび制御装置からの指令操作で動作すること。
- (5) 管内の観察性能として、以下の項目を満足すること。
 - ・配管内面の状態が観察できること。
 - ・暗環境でも配管内面が観察できること。
 - ・配管内面上の幅 100 μ m 程度の傷または異物を認識できること。

配管内部放射能汚染分布測定システムの全体構成を図 7.28 に示す。このシステムは 3 インチ管用の管内移動ロボットの後部に小型汚染検出器と中継コネクタボックスを牽引し、データ処理装置、ケーブル巻取装置から構成されている。小型放射能汚染検出器は管内移動ロボットと中継コネクタボックスの間に連結され、管内をロボットに牽引されながら管内の放射能汚染量を測定する。管内移動ロボットは、管内を走行するための車輪走行機構が本体の前後に取り付けられ、その間にステアリング用の FMA が装着されている。曲管部ではこの FMA を湾曲させて車輪走行機構の首振り動作を行い、曲管部のスムーズな通過を可能にさせる。小型放射能汚染検出器は放射状に配置された突起部で検出部が管の軸心に対してセンタリングされるように構成されている。そして、測定には反応ガスが必要となるためにそれを注入するチューブが接続されている。

管内を観察するための CCD カメラと照明ランプがロボットの先端部に取り付けられており、暗環境でもロボットの操作と管内部の観察を可能にする。データ処理装置は、放射線カウンタ、テレビモニタ、制御用パソコン、ロボットコントローラ等から構成され、管内移動

ロボットと放射線カウンタを制御し、放射能汚染分布を自動測定させる。中継コネクタボックスには、ロボットとケーブルを分離するための各種コネクタが収納されている。

図 7.29 に開発したロボットのシステム構成を示す。ロボットの制御を行うデータ処理装置は、制御用パソコン、ロボットの動作を制御する駆動回路、モニタなどから構成されている。放射線カウンタは検出器からの放射線量を計数し、制御用パソコンで、放射線量に関する演算処理を行っている。ロボット本体には CCD カメラ、車輪走行機構駆動用の前輪モータ、後輪モータ、エンコーダ、FMA、照明などを搭載し、ロボット本体とデータ処理装置はケーブルで接続されている。ケーブルは検出器用高圧ケーブル、CCD カメラ用電線、モータ用電線、FMA 用のエアチューブおよび検出器用の反応ガス注入用チューブなどから構成されている。

ロボットの操作はオペレータが搭載した CCD カメラ映像を見ながら操作ボックスで行う手動運転と制御パソコンからの指令で動作する自動運転がある。この管内移動ロボットの後部の車輪走行機構に小型の磁気式エンコーダをモータ出力軸に搭載させている。このエンコーダによりロボットの移動距離や移動速度の検出が可能となり、ロボットの自動運転が可能となる。

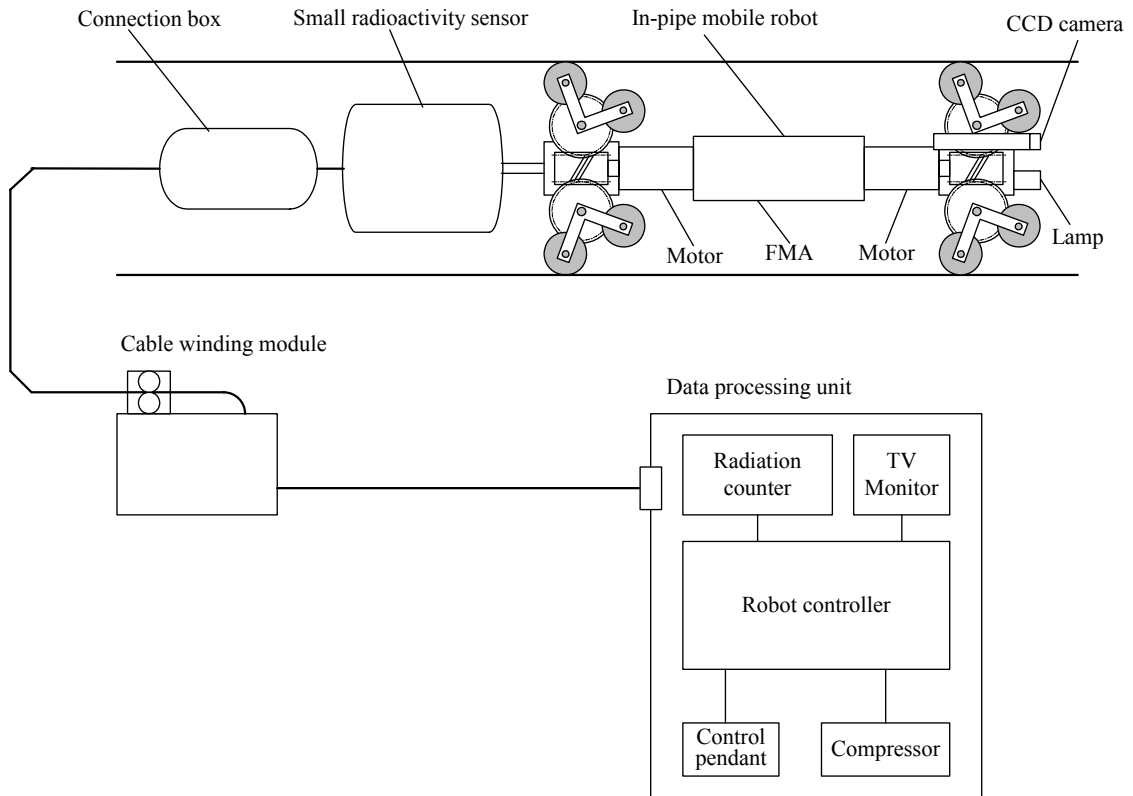


Fig. 7.28 Configuration of radioactivity measuring robot system

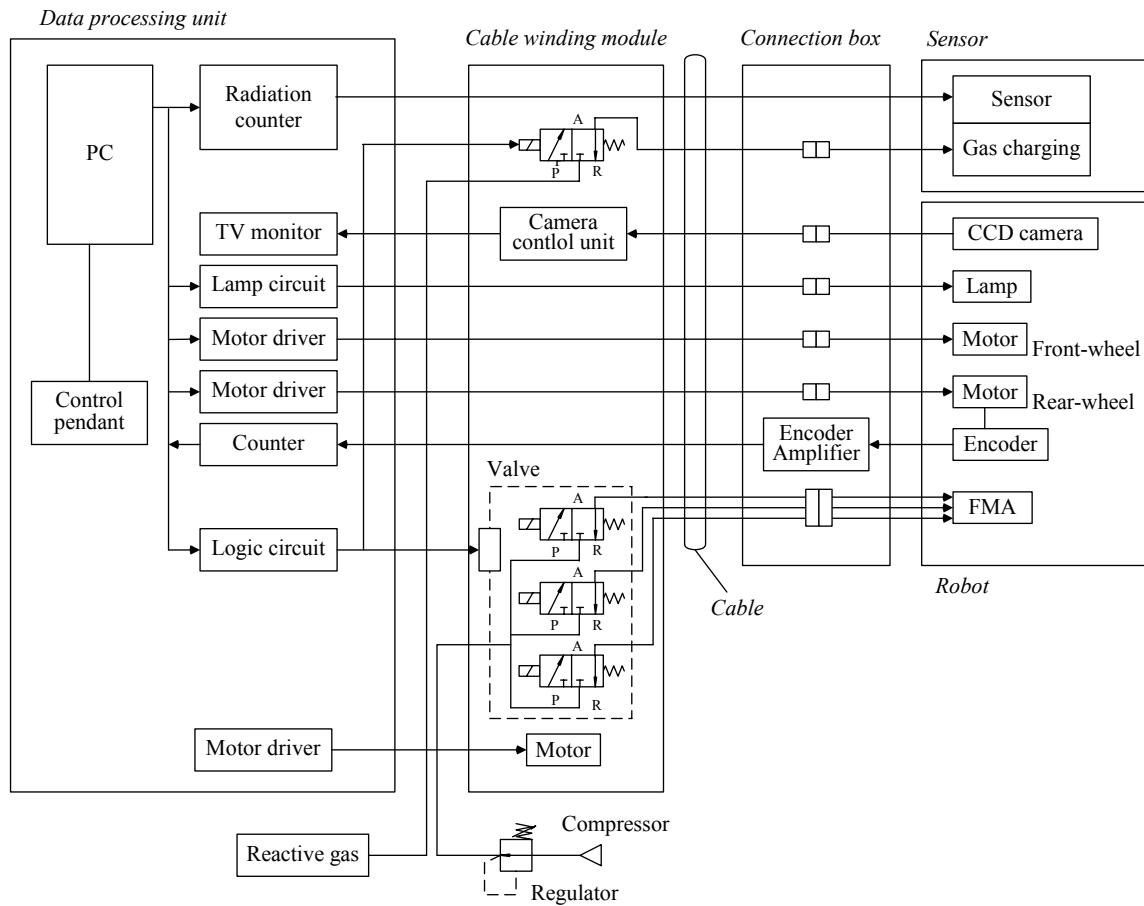


Fig. 7.29 Configuration of radioactivity measuring robot control system

7.6.2 設計・試作

図 7.30 に設計試作した 3 インチ管用の管内移動作業ロボットの略断面図を示す。ロボットの中央部に FMA を配置し、その前後に車輪走行機構を装備させた構成とした。前後に装着された車輪走行機構は 4 個の車輪列から構成されたものとした。これらの車輪列を管壁に押しえつけながら、車輪の回転力で管内を走行させる。ロボットのサイズは外径 71mm、長さ 270mm、質量約 500g である。

車輪走行機構の動力源であるモータには減速機付き DC モータを用いる。太陽歯車、遊星歯車のモジュールは 0.5mm で歯数は 48, 16 である。3 インチ管用車輪走行機構のウォームと太陽歯車間の速比、太陽歯車と遊星歯車間の速比は、それぞれ $u_P=1/48$, $u_G=3$ であり、減速機付き DC モータの回転は 1/16 に減速されて車輪に伝達される。後輪駆動部にはロボットの移動量を検出するためのエンコーダが図 7.30 に示すように装着されている。このエンコーダは磁気ドラムと MR センサで構成される磁気式エンコーダで、モータ出力軸の回転位置を検出する。ロボットの車輪は円錐形状とし、幅が 3mm で幅方向の中心での外径が 13.2mm のゴム製とした。

配管の T 字管やエルボ管を通過させるためにロボットの中央部にステアリング機能を行う FMA を配置させた。使用した FMA のサイズは外径 24mm、長さ 130mm で、FMA の駆動空気圧は 0.2MPa とした。

観察機構には管内面の目視点検に要求される高画質を得るために、1/4 インチ総画素数 41 万画素の CCD カラーカメラを搭載する。レンズ装着時のカメラヘッドサイズは直径 7mm、長さ 47mm とする。CCD カメラはカメラヘッド部とカメラ制御部（映像出力装置）とをカメラケーブルで接続するカメラヘッド分離型構造である。カメラケーブルの長さは 15m で、表 7.4 に搭載した CCD カメラの主な仕様とレンズの仕様を示す。照明には照度 10,000lx（10mm 先）で、外径 5.7mm、長さ 17.5mm のものを使用した。表 7.4 に用いた CCD カメラとレンズの仕様を示す。

管内の放射能を検出する小型検出器は外径 71mm、長さ 80mm である。接続されている小型検出器、中継ボックスとロボットをあわせた質量は約 1,000g である。ケーブルの単位長さあたりの質量は約 135g/m である。

ケーブル巻取装置はケーブル巻取部、ケーブル収納容器および各種制御機器から構成されている。巻取部は 1 対の搬送ローラとモータより構成され、ローラ間にケーブルを挟み込み、ローラの回転でケーブルの巻き取りを行う構造のものである。ケーブルは巻取装置には、CCD カメラ制御装置、電磁弁などが装備されている。

表 7.5 に 3 インチ管用管内移動ロボットの仕様、図 7.31 に 3 インチ管用の管内移動ロボットの外観写真を示す。

7.6.3 配管内部放射能汚染測定ロボットの評価試験

(a) 実規模模擬配管での走行実験

試作した3インチ用管内移動ロボットを図 7.32 に示した形状のT字管および曲率半径が異なる2種類のエルボ管を用いて構成したアクリル製模擬配管で走行試験を行った。配管はsch40規格の3インチ管とし、その内径は78.1mmである。走行実験は小型検出器および中継コネクタボックスを連結させた状態で行った。3インチ管用の管内移動ロボットの基本性能は水平直管内において、最大移動速度22mm/s、最大牽引力35Nであった。スリップ比率は第3章の式(3.27)から算出し、ロボットを1000mm走行させた場合のスリップ比率は1%程度であることを確認した。また、最大牽引力は35Nであり、この値はロボット自重の約7倍の値であり、大きな牽引力が得られることが確認できた。

溶接箇所のリフトによる段差部走行実験は、幅50mmのシリコンゴムを管内に置いて高さ4mmの段差部を管内に模擬的に設置した。走行実験の結果、段差通過時にFMAがわずかに変形するがスムーズに段差を乗り越えられることを確認した。

観察性能は、管内部に入る光を遮断しCCDカメラと照明のみで走行させた環境においても管内面の状態がテレビモニターで観察でき、搭載したCCDカメラは暗環境でも搭載した照明で幅0.1mmのラインの検出が可能であった。

3インチ管用の管内移動作業ロボットの実規模配管の適用性実験は図 7.33 に示す2種の配管のパターンで行った。配管のパターンは直管の水平配管および勾配配管、エルボ、T字管を組み合わせて構成する。こう配配管のこう配は5%とした。実規模配管のパターン#Aは曲管部を1箇所もつ構成で、パターン#Bは曲管部を3箇所もつ構成とした。ロボットの走行距離はそれぞれ、10m、15mである。曲管部は管軸中心での曲率半径が76mmと114mmの2種とした。こう配配管のこう配はロボットの進行方向に対して上昇するように設定されている。いずれの配管パターンはスタート位置をA、到達位置をBとする。

実規模配管の走行実験では、ロボットの本体部のFMAを屈曲させる操作を行いながら前進させることで、曲管部や分岐部への通過がスムーズに行えた。曲率半径114mmの曲管部の通過時はFMAの屈曲操作を行わなくてもFMAのゴムの弾性変形で通過でき、ロボットは速度一定で曲管の通過が可能であった。T字部と曲管部の曲管の曲率半径と管内半径から決まる定数はそれぞれ、 $K_B=1.51$ 、1.34である。ロボットは実規模配管のパターン#A、#BとともにA点をスタートしB点まで手動操作で走行させることができた。この結果から、全長15mで1つのT字部と2個のエルボ管を有する配管内をスムーズに走行でき、3インチ管用管内移動ロボットは実規模の配管に適用できる走行性能を十分持っていることが確認できた。ロボットのこう配部の走行の様子を図 7.34 に、曲率半径76mmのエルボ管の通過の様子を図 7.35 に、T字部の通過の様子を図 7.36 に、それぞれ示す。

以上の実験結果から、7.3.1項で述べた設計仕様をすべて満たしていることを検証できた。

(b) 基準線源を用いた放射線測定実験

放射線の測定試験は図 7.37 に示す配管パターンのパイプE-Bの一部に放射線源を配置させて測定を行った。放射線源は金属製配管の内部に基準面線源 $1\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、 $10\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、 $100\text{Bq}/\text{cm}^2$ を管軸方向に配置したものを使用した。図 7.38 に基準面線源の外観写真を示す。管の内面に基準面線源 $1\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、 $10\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、 $100\text{Bq}/\text{cm}^2$ が存在する配管内にロボットを走行させて、線源強度に対する位置分解能の実験を行った。図 7.39 にパイプE-Bを自動運転させて場合の実験結果を示す。横軸が距離で縦軸が線源強度である。線源強度による3つの

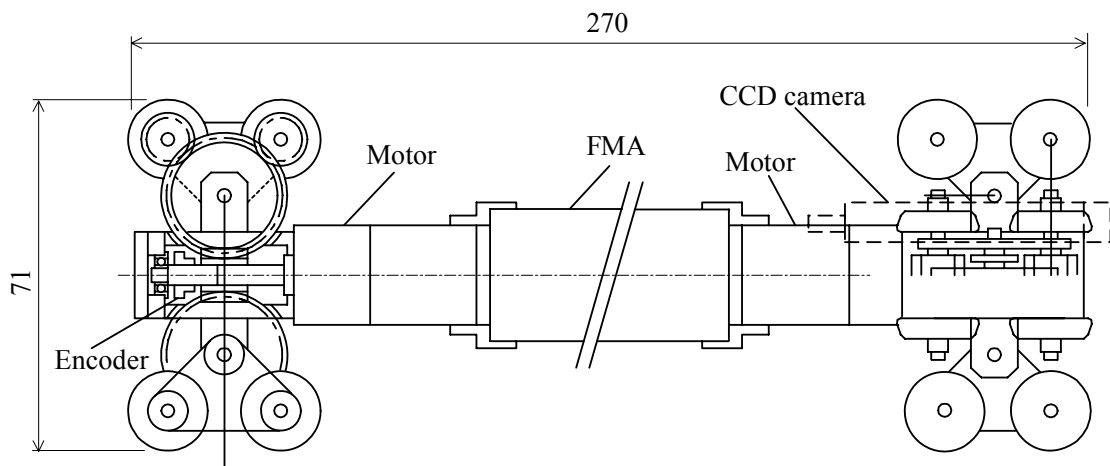
ピークが計測でき、管内移動作業ロボットと小型放射能汚染検出器を組み合わせた実験で $1\text{Bq}/\text{cm}^2$ の放射能強度が計測できることを確認した。

Table 7.4 Camera and lens specifications of in-pipe mobile robot for 3-inch pipes

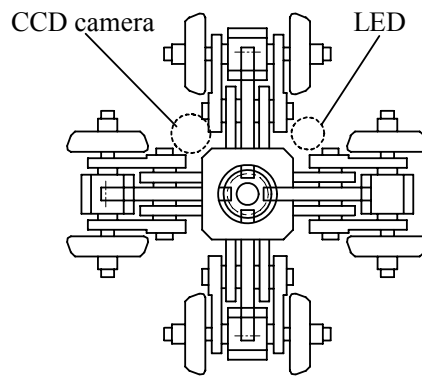
Size	$\phi 7.0 \times 47 \text{ mm}$
Mass	4 g
CCD	1/4 inch, 410,000 pixels
Video output	NTSC system
Resolution	More than 470 lines(H), More than 350 lines(V)
Standard intensity	400 lx (F2.5, 3000K)
Lens	F4.0mm F2.5 Picture angle 39° (H), 51° (V)
Power	DC 12V, 5W

Table 7.5 Specifications of in-pipe mobile robot for 3-inch pipes

Size	Diameter 71 mm Length 270 mm
Mass	500 g
Motor size	DC motor with planetary gear-head Diameter 18 mm Length 41 mm
Coupling	FMA Diameter 24 mm Length 130 mm
Camera	CCD color camera (IK-SM45H) Lens JK-L04S($f=2.5\text{mm}$, $F=2.5$)
Distance measurement	Magnetic encoder



(a) Front view of in-pipe mobile robot for 3-inch pipes



(b) Side view of in-pipe mobile robot

Fig. 7.30 Cross-sectional view of in-pipe mobile robot for 3-inch pipes



Fig.7.31 Photograph of in-pipe mobile robot for 3-inch pipes

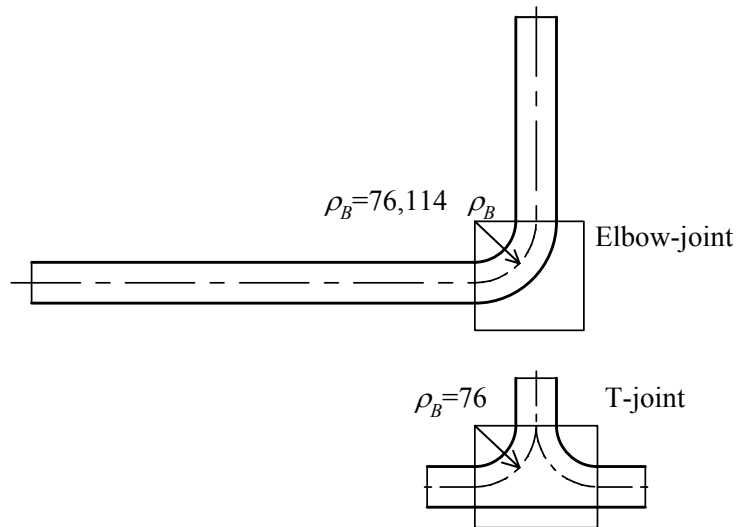
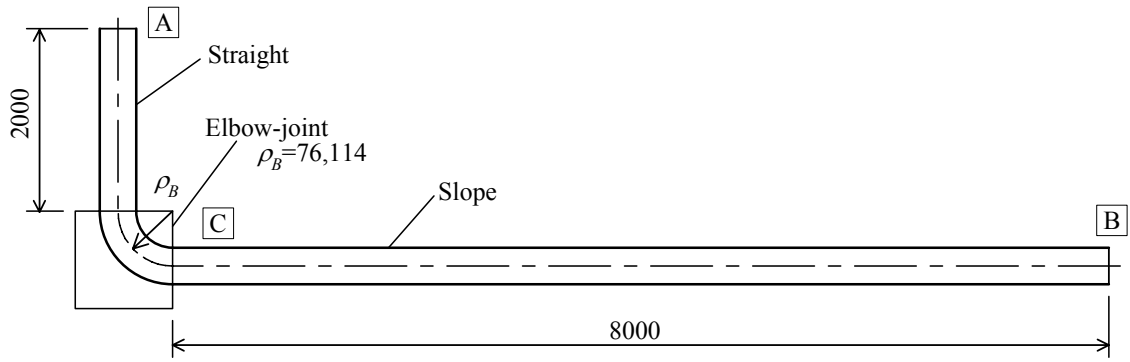
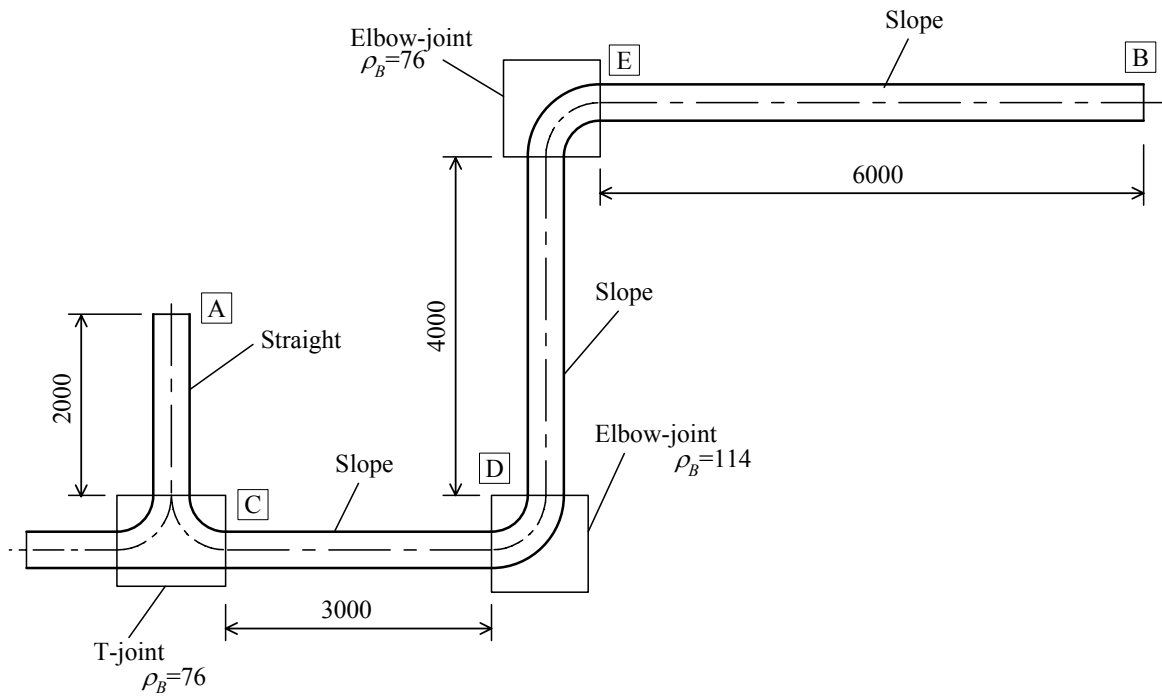


Fig.7.32 Configuration of elbow-joint and T-joint for 3-inch pipes



(a) pipe pattern #A



(b) pipe pattern #B

Fig.7.33 Configuration of test piping for 3-inch pipes

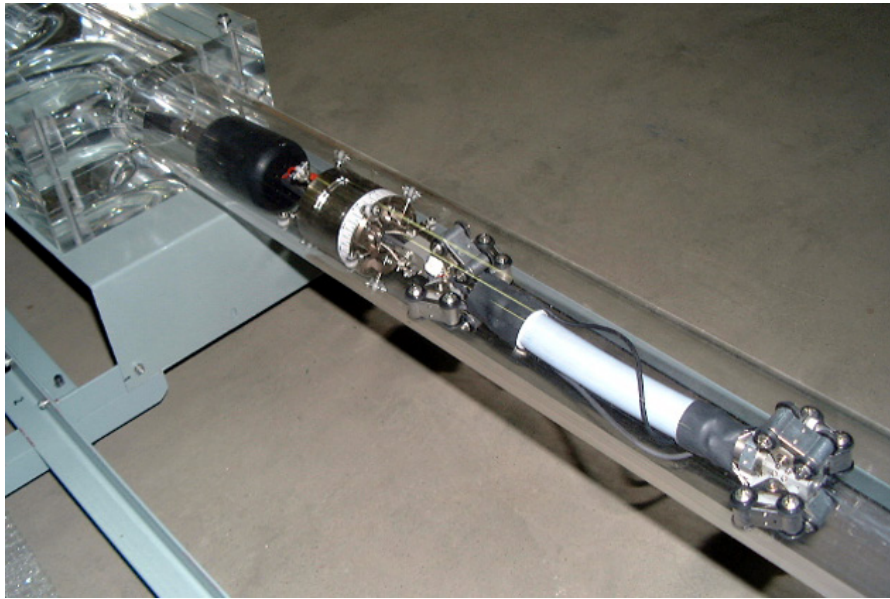


Fig.7.34 Locomotion through a slope pipe

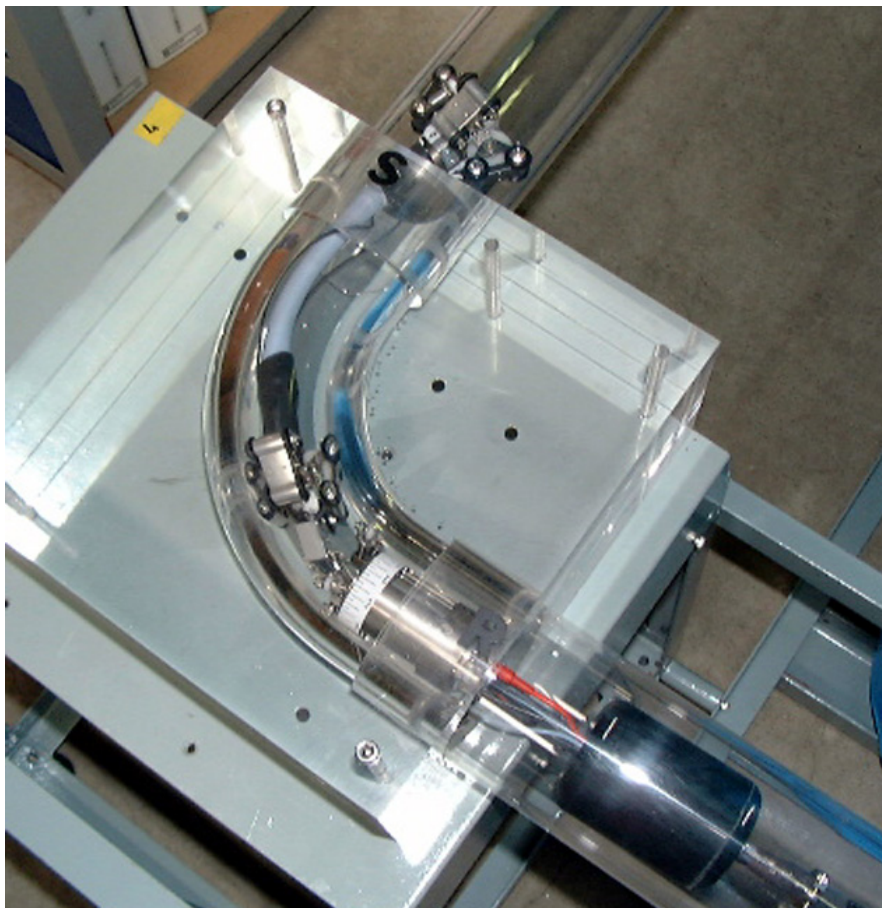


Fig.7.35 Locomotion through a elbow-joint

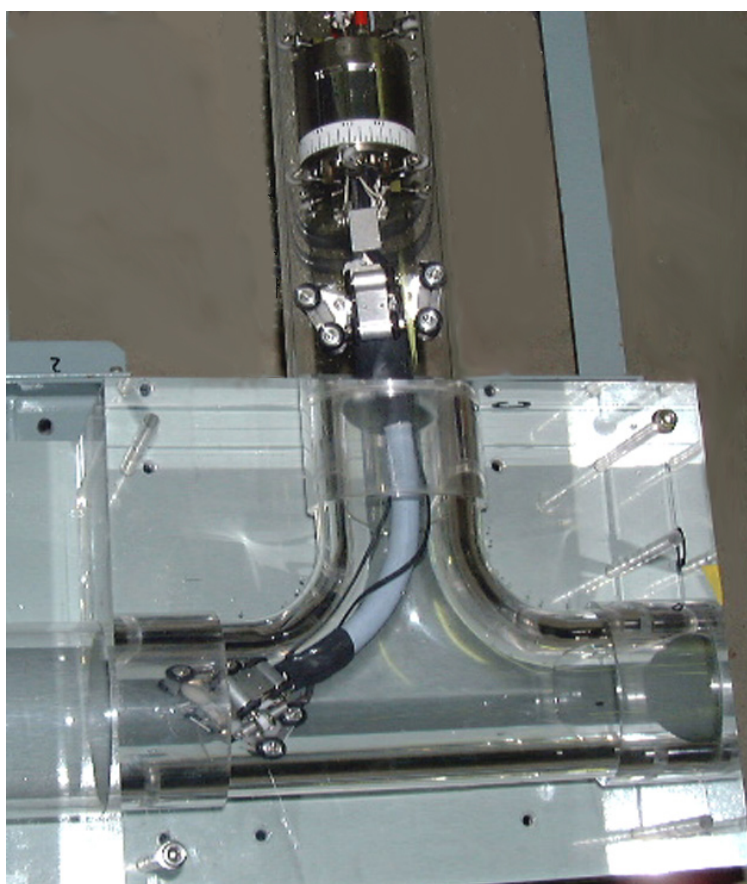


Fig.7.36 Locomotion through a T-joint

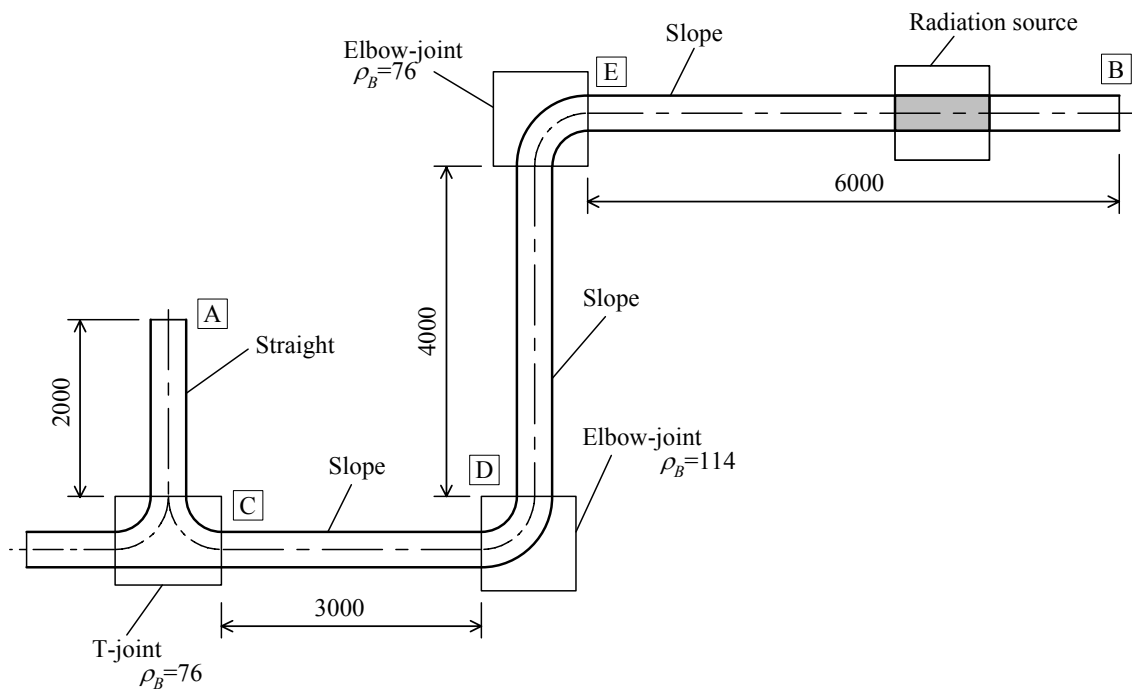


Fig.7.37 Measurement of residual radioactivity

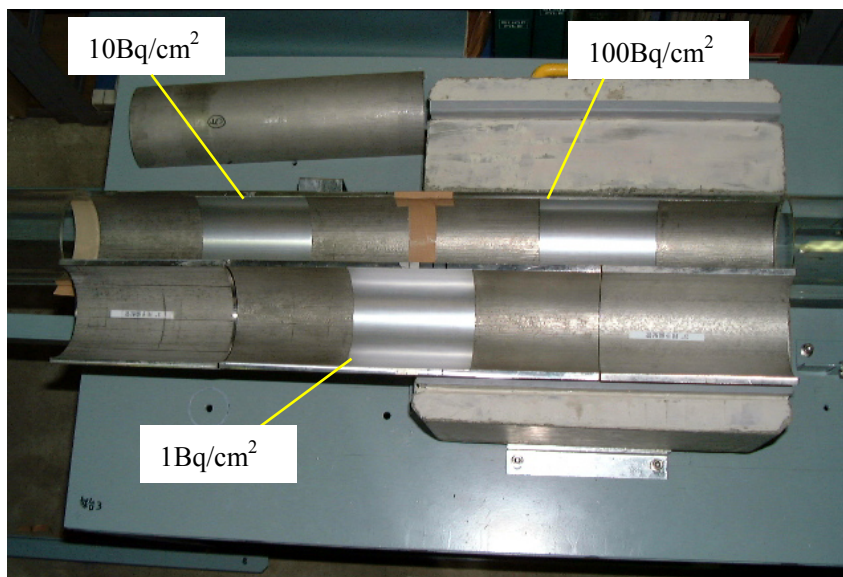


Fig.7.38 Photograph of radiation source

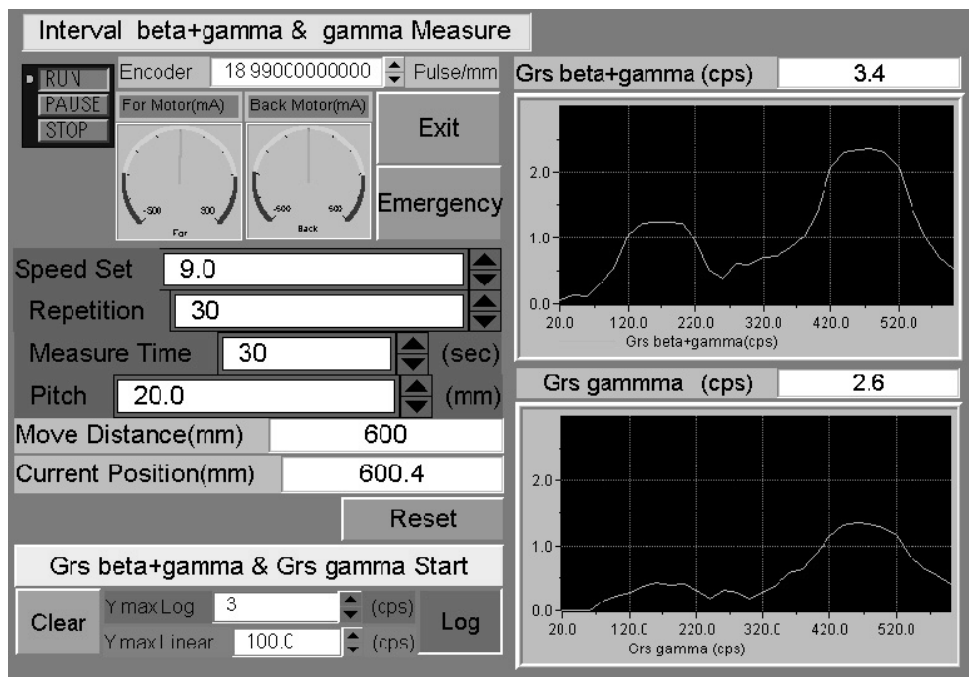


Fig.7.39 Experimental result of radioactivity level

Table 7.6 Characteristics of the in-pipe mobile working robots

	Smaller than 1-inch	1-inch	2-inch	3-inch
Applicable piping (Inside diameter)	20 mm	24 mm	48 mm	78.1 mm
Robot size	Diameter 19 mm Length 80 mm	Diameter 23 mm Length 110 mm	Diameter 45 mm Length 145 mm	Diameter 71 mm Length 270
Motor size	Diameter 5 mm Length 12 mm	Diameter 5 mm Length 12 mm	Diameter 14 mm Length 46 mm	Diameter 18 mm Length 41 mm
Wheel diameter	3.3 mm	4.6 mm	9.4 mm	13.2 mm
Running speed	4.2 mm/s	6 mm/s	11 mm/s	24 mm/s
Traction force	1.8N Double drive	1N Double drive	20 N Single drive	35 N Double drive
Piping form	Vertical pipe Elbow-joint (Radius 60mm)	Vertical pipe Elbow-joint (Radius 120mm)	Vertical pipe Elbow-joint (Radius 181mm) Steps piping (Steps 0.5mm)	Vertical pipe Elbow-joint (Radius 76mm) T-joint (Radius 76mm) Steps piping (Steps 4mm)
Inspection function	None	CCD camera Hand Rotation mechanism	(CCD camera)	CCD camera Radioactivity sensor

7.7 まとめ

遊星歯車式管径追従車輪走行機構を用いた小口径管内移動作業ロボットを設計・試作し、模擬配管を用いた走行試験および検査作業の評価を行いそれぞれのロボットの有用性を実験的に検討した。得られた管内移動作業ロボットの性能を表 7.6 にまとめる。本章で得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 2 インチ管用のロボットで直管，曲管，段差管で構成された管内を用いた総合走行試験を行い，特別な制御が必要なく走行できることを確認した。
- (2) 遊星歯車式管径追従車輪走行機構とアクチュエータの細径化で 1 インチ以下（管径 20mm）の細径管内を移動できるロボットに適用できることを実証した。また，試作機の最大牽引力は自重の 10 倍程度であることがわかった。
- (3) 1 インチ用管内移動作業ロボットは管内径が 1 インチの配管内部を自走でき，目視検査用の CCD カメラと異物の回収用のマイクロハンドを有したロボットを試作した。模擬配管での走行試験および検査作業の評価を行い，走行性能および観察性能は仕様を満足することを検証した。
- (4) 遊星歯車式管径追従車輪走行機構と空気圧アクチュエータ FMA を組み合わせた 3 インチ用管内移動作業ロボットは，放射能汚染検出器を連結し，全長 15m で 1 つの T 字部と 2 個のエルボ管を有する模擬配管において，管内走行ならびに汚染量分布計測ともスムーズな動作が実現でき，3 インチ配管内部放射能汚染測定ロボットは実規模の配管に適用できる移動・作業性能を十分持っていることを検証した。

第8章 結論

8.1 本研究で得られた成果

発電施設や建屋などにおける小口径配管は設置場所やその周囲環境から外部からの検査または分解検査が困難であることから、配管内部からの検査を目的とした小口径管内移動作業ロボットの実用化が強く望まれている。そのようなロボットには垂直管、曲管、段差管、分岐管などから構成されている管内を安定して走行でき、かつ高い信頼性を有する移動機構の実現が課題であった。

車輪を管壁に押付けつつ走行でき、異なる管径に対しても対応できる遊星歯車式管径追従車輪走行機構は、車輪を管壁にグリップさせる押付け機構を用いることがなく、小口径管内（1～3インチ管）で車輪走行機構の共通化設計が可能である。そこでこの機構を小口径管内移動作業ロボットの移動機構として採用し、垂直管、曲管、段差管管内の走行時の運動特性ならびに力学特性を把握し、試作した2種類の小口径管内移動作業ロボットの走行特性ならびに作業性能が実用レベルにあること示した。

本研究で得られた結果を要約すれば以下のとおりである。

- (1) 管内走行機構の設計に必要な基本仕様をロボットに要求される特性要因を総合的に評価し、本研究で対象とする小口径管内移動ロボットの基本仕様を明らかにした。そして、遊星歯車式管径追従車輪走行機構の基本構成および駆動原理を示し、1, 2, 3インチ管に適用する遊星歯車式管径追従車輪走行機構をそれぞれ試作して基本走行実験を行い、共通の設計で1, 2, 3インチ管に適用できる機構であることを示した。また、本機構は1インチ以下の極細径管内用のロボットにも適用可能であることを示した。
- (2) 直管走行における管内移動ロボットの力学特性を明らかにするために、まず、遊星歯車式管径追従車輪走行機構の直管走行時の力学解析を行い、管軸方向の負荷および車輪と遊星歯車のキャリアの角度と車輪の管壁への押付け力の関係を検討した。そして、車輪走行機構の構成要素である歯車列のエネルギー伝達効率と車輪と管壁との静止摩擦係数を実験で明らかにし、試作した外径45mm、長さ130mmのロボットの最大牽引力が自重の20倍であり、小型軽量化が実現できたことを示した。
- (3) 遊星歯車式管径追従車輪走行機構による管内移動ロボットの曲管走行時の力学解析を行い、曲管走行時の駆動トルクは曲管部の曲率半径と管内径からなる定数を直管走行時の駆動トルクに乗ずることにより求められることを示した。そして、遊星歯車式管径追従車輪走行機構にフレキシブルカップリングを取り付けた試作機により曲管走行時の負荷走行実験を行い、駆動トルクの解析結果の妥当性を示した。
- (4) 段差走行時の走行特性を明らかにするために、まず、車輪走行機構が段差を通過する過程の力学解析を行い、車輪走行機構を構成する太陽歯車と遊星歯車のかみあい点の位置が車輪と段差が接触する位置よりも前方となる幾何学的条件を満たすことで段差を乗り越えられることを明らかにした。そして、試作機の段差乗り越え性能には車輪の弾性変形が大きく影響することを指摘して、車輪の弾性変形を考慮した解析を行った。その結果、駆動用アクチュエータの制御系を含めた管内移動ロボットの段差通過時の現象を把握でき、設計指針として、段差を乗り越えられる幾何学的条件を示した。
- (5) 小口径管内移動作業ロボットの動力源として小型で高トルクのサーボアクチュエータの構成について検討し、ブラシレスDCモータと3K型不思議遊星歯車減速機を組み合わせ

せることで最もコンパクトなサーボアクチュエータを構成することを示した。そして、高トルク化が達成できるブラシレス DC モータのロータ極数とコイル数を検討し、小型の 3K 型不思議遊星歯車減速機的设计にかみあい率均等化による効率改善手法を適用することで効率は従来設計と比べ 10%程度向上すること、そしてこれらの設計法で得られた試作機のトルクは同じトルクを発生できる従来品と比べ、トルク／体積比は高く体積は約 30%減であることを示した。

(6) 試作した 2 インチ管用のロボットで直管，曲管，段差管で構成された管内の総合走行試験を行い，特別な制御が必要なく走行できることを確認した。1 インチ以下の極細径管内については，第 6 章で示した設計法を用い超小型のアクチュエータを開発し，そのアクチュエータと走行機構を一体化することで短尺化が可能であり，極細径管内にも適用できることを実証した。そして，2 種類の小口径管内移動作業ロボットを設計・試作し，1 インチにおける検査・異物回収ロボットおよび配管内部放射能汚染測定ロボットの走行特性，作業機能が実用的な性能を有していることを検証した。

8.2 今後の課題

小口径管内移動作業ロボットおよびシステム全体を考えた今後の主な課題を以下に示す。

(1) 曲管の最小曲率半径の把握

ロボットが通過できる曲管の最小曲率半径を把握できておらず、ロボットの設計段階で限界値を試算できることが必要である。そこで、フレキシブルカップリングの曲げ剛性の影響と走行機構の姿勢誤差を考慮した理論解析を行うとともに、多数の管径と曲率の曲管に対する実験検証を行う。

(2) ねじ継手部への適用

配管の継手が溶接継手の場合においては段差の高さは比較的小さく機構設計と車輪の弾性変形で乗り越えは可能であるが、ガス管への適用を考慮するとねじ継手の 90° エルボが通過できる必要がある。ねじ継手の 90° エルボの断面はねじ部での段差が高く、エルボでの管径は直管部の管径よりも大きい。ガス管への適用にはこのエルボ通過が最大の課題であるとする。車輪径を大きくできる機構の採用や FMA の積極的な動作により通過特性に及ぼす効果などについて検討したい。

(3) 検査用センサの検討

管内の検査用センサとしては CCD カメラと放射能汚染検出器しか検討しておらず、そのセンサの姿勢制御の検討も行っていない。管壁の詳細な検査を行うには磁気センサが有力な候補であると考えられる。磁気センサは管壁とのギャップや傾き等がセンサ分解能に影響を及ぼすことから、小型磁気センサの開発も含めたセンサ位置決め機構の検討が課題である。

(4) 自動化・自律化

管内検査ロボットは遠隔操作型であり、人間が操作を行っているが検査に時間がかかると人間の負担が大きくなる。また、搭載したカメラ映像のみでエルボ通過させるにはその操作に技術が必要となる。これらの負担を軽減するためにロボットに外界センサ等を搭載し、そのセンサ情報で自動運転および曲管の形状を検知して自律的に管内を移動できることが検査の均一性と信頼性の向上および作業の効率化に必要である。

(5) その他

本研究の管内移動作業ロボットに限らないが一般的な管内移動ロボットの共通の課題として電力及び信号などケーブル類を牽引するための摩擦抵抗が問題となる。この抵抗力は曲管部の数が多くなると極端に増加するためにケーブルにローラなどを装着させて抵抗力を低減させることが必要である。

参考文献

- (1) 例えば, 日本原子力文化振興財団のホームページ, <http://www.jaero.or.jp/index.html>.
- (2) 例えば, 日本原子力研究所バックエンド技術部, OECD/NEA廃止措置協力に関する活動状況と参加プロジェクトの現状, JAERI-Review 2000-013, (2000).
- (3) 柳原敏, 畠山睦夫, 伊藤博邦, 森俊二, 高木昭, 高谷純一, 畠中秀雄, 高橋是道, 伊藤勝人, 自己位置同定システムを用いた放射能測定移動ロボットの開発, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (2000), pp.333-334.
- (4) 畠山睦夫, 伊藤博邦, 柳原敏, 低レベル放射能汚染分布測定技術の開発(II), 1999年原子力学会春の年会, M51, (1999).
- (5) 伊藤博邦, 畠山睦夫, 柳原敏, 低レベル放射能汚染分布測定技術の開発(III), 2000年原子力学会春の年会, G39, (2000).
- (6) 例えば, 東京都水道局ホームページ, 東京水道新世紀構想 STEP21, <http://www.waterworks.metro.tokyo.jp>.
- (7) 例えば, 社団法人日本下水道管路管理業協会ホームページ, <http://www.jascoma.com/index.html>
- (8) 例えば, 防災システム研究所のホームページ, 過去と最近の主な災害, <http://www.bo-sai.co.jp/index.html>
- (9) 例えば, 日経メカニカル, 小口径配管内自走ロボット, (1989), pp.32-40.
- (10) 富田鏡二, 高木淳, 栗田真一, 坂本清詩, 内藤紳司, 小口径導管検査ロボットの開発, 日立評論, Vol.68, No.10, (1986), pp.31-34.
- (11) 藤田明孝, ガス導管検査ロボットの開発について, Robot, No.59, (1987), pp.72-79.
- (12) 小沢道夫, 長谷川宏幸, 川畑一夫他, 管内自走式鋼管減肉検査装置, 非破壊検査講演概要集, Vol.36, No.9, (1987), pp.696-697.
- (13) 藤原茂, 金原了二, 岡田徳次, 実森毅, 分散型主要配管内検査点検ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.2, (1994), pp.318-327.
- (14) 田口幹, 河原崎徳之, ユニット型小口径配管内走行検査ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2, (1997), pp.68-73.
- (15) 広瀬茂男, 三井健雄, Whole Stem Drive 型配管内移動機構の提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会'93 講演論文集, (1993), pp.699-702.
- (16) 広瀬茂男, 三井健雄, Whole Stem Drive 型配管内移動機構(螺旋回転型としゃくとり虫型の提案), 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1993), pp.1111-1114.
- (17) S. Hirose, H. Ohno, T.Mitsui and K.Suyama, Design of In-pipe Inspection Vehicles for $\phi 25$, $\phi 50$, $\phi 150$ pipes, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA1999), (1999), pp.2309-2314.
- (18) M. Muramatsu, N. Namiki, R. Koyama and Y. Suga, Autonomous Mobile Robot in Piping Operations, Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robot and System (IROS2000), (2000), pp.2166-2171.
- (19) S. G. Roh, S. M. Ryew, J. H. Yang and H.R.Choi, Actively Steerable Inpipe Inspection Robots for Underground Urban Gas Pipelines, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2001), (2001), pp.761-766.

- (20) S. G. Roh and H. R. Choi, Strategy for Navigation Inside Pipelines with Differential-drive Inpipe Robot, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2002), (2002), pp. 2575-2580.
- (21) 大久保助正, 加藤和政, 配管内遠隔操作検査技術の適用, 配管技術, Vol.30, No.12, (1988), pp.106-110.
- (22) H. T. Roman, B. A. Pellegrino and W. R. Sigrist, Pipe crawling inspection robots: an overview, IEEE Trans of Energy Conversion, (1993), pp.576-583.
- (23) 広瀬茂男, 三井健雄, 安永和敏, 50mm ガス管検査用移動ロボットの開発, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1995), pp.877-878.
- (24) 三井健雄, 広瀬茂男, CCV型配管内移動ロボットの開発, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1995), pp.875-876.
- (25) 福田敏男, 細貝英実, 管内走行検査ロボットの研究 検査ロボットの製作と走行・検査結果, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.52, No.477, (1986), pp.1584-1588.
- (26) T. Fukuda, H. Hosokai and M. Uemura, Rubber gas actuator driven by hydrogen storage alloy for in-pipe inspection mobile robot with flexible structure, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA1989), Vol. 3, (1989), pp. 1847-1852.
- (27) C. Anthierens, A. Ciftci and M. Betemps, Design of an electro pneumatic micro robot for in-pipe inspection, IEEE Int.Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Vol. 2, (1999), pp. 968-972.
- (28) 則次俊郎, 久保田充彦, 空気圧アクチュエータを用いた管内移動ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6, (1999), pp.831-838.
- (29) 山本純雄, 佐藤啓仁, 福島裕人, 斎藤秀次郎, 弾性毛を用いた円筒内移動体について 機構と基本的機能, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.54, No.506, (1989), pp.2471-2474.
- (30) 青島伸一, 森光武則, 辻村健, 圧電素子を用いた細径管移動機械に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.55, No.516, (1989), pp.1934-1940.
- (31) 佐藤啓仁, 山本純雄, 斎藤秀次郎, 池原忠好, 圧電素子を用いた円筒内移動体について 移動に関する基礎実験, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.57, No.538, (1991), pp.1860-1865.
- (32) 山本純雄, 佐藤啓仁, 菊池克行, 松井智仁, 弾性毛を用いた円筒内移動体ロボット第2報, 機構の改良と劣悪条件下での移動, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.57, No.540, (1991), pp.2675-2678.
- (33) T. Idogaki, H. Kanayama, N. Ohya; H. Suzuki and T.Hattori, Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for an in-pipe micro inspection machine, Proc. of Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS), (1995), pp.193-198.
- (34) S. Iwashina, I. Hayashi, N. Iwatsuki and K. Nakamura, Development of in-pipe operation micro robots, Proc. of Fifth International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS), (1994), pp.41-45.
- (35) I. Hayashi, N. Iwatsuki and S. Iwashina, The running characteristics of a screw-principle microrobot in a small bent pipe, Proc. of Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS), (1995), pp.225-228.

- (36) 広瀬茂男, 大野英隆, 25mm ガス管検査用移動機構の開発, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1997), pp.257-258.
- (37) T. Suzuki and M.Sato, In-Pipe Miniature Mobile Robot with Worm Wheel Mechanism, 第 34 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, (1995), pp.847-848.
- (38) K. Suzumori and A. Abe, Applying Flexible Micro-actuators to Pipeline Inspection Robots, Trans. of the IMACS/SICE International Symposium on Robotic, Mechatronics and Manufacturing Systems, (1993), pp.515-520.
- (39) 鈴森康一, 阿部朗, 島村光明, 2 インチ配管用管内点検ロボットの開発, 第 8 回日本ロボット学会学術講演会, (1990), pp.203-204.
- (40) 鈴森康一, フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.55, No.518, (1989), pp.2547-2552.
- (41) 鈴森康一, 堀光平, 宮川豊美, 古賀章浩, マイクロロボットのためのアクチュエータ技術, コロナ社, (1998), pp.158-163.
- (42) 川口圭史, 吉田乙雄, 車谷治通, 菊田隆, 鉄管内走行ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, (1996), pp.137-143.
- (43) 山口敏明, 香川美二, 林 巖, 岩附信行, 森川広一, 中村勝巳, 段差通過が可能な「ねじ原理」移動作業マイクロロボットの研究, 精密工学会誌, Vol.66, No.4, (2000), pp.606-611.
- (44) 大野学, 濱野聡明, 加藤重雄, 長距離走行を可能とする小径管内走行ロボットの基礎研究, 精密工学会誌, Vol.69, No.4, (2003), pp.564-569.
- (45) 長田翼, 大野学, 加藤重雄, 小径管内の大きな段差を通過できるロボットの改良, 日本機械学会東北支部第 41 期秋期講演会講演論文集, (2005), pp.67-68.
- (46) 高橋昌樹, 林 巖, 岩附信行, 鈴森康一, 黄木昇, みみずの運動を応用した細径内移動マイクロロボットの研究, 精密工学会誌, Vol.61, No.1, (1995), pp.90-94.
- (47) 宮川豊美, 鈴森康一, 木村正信, 長谷川幸久, 小口径配管作業ロボットの開発, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1997), pp.255-256.
- (48) 両角宗晴, 遊星歯車と差動歯車の理論と設計計算法, 日刊工業新聞社, (1989).
- (49) 宮川豊美, 鈴森康一, 木村正信, 長谷川幸久, 1 インチ用配管作業ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3, (1999), pp.389-395.
- (50) 柳原敏, 伊藤博邦, 畠山睦夫, 宮川豊美, 鈴森康一, 配管内部汚染分布測定ロボットの開発 (第 1 報, システム構成と管内移動機構の開発), 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, (2000), pp.141-142.
- (51) 柳原敏, 伊藤博邦, 畠山睦夫, 宮川豊美, 鈴森康一, 配管内部汚染分布測定ロボットの開発 (第 2 報, 管内移動と管内面の汚染分布測定の実施), 第 18 回日本ロボット学会学術講演会, (2000), pp.143-144.
- (52) 宮川豊美, 岩附信行, 遊星歯車式車輪走行機構による小口径管内移動ロボットの走行特性, 精密工学会誌, Vol.72, No.12, (2006), pp.1547-1552.
- (53) T. Miyagawa and N. Iwatsuki, Characteristics of In-pipe Mobile Robot with Wheel Drive Mechanism using Planetary Gears, Proc. of IEEE Int. conf. on Mechatronics and Automation (ICMA2007), (2007), pp 3646-3651.
- (54) 仙波正荘, 歯車, 1, 日刊工業新聞社, (1969), pp.230-240.

- (55) 宮川豊美, 神野誠, 中山忠弘, 長谷川幸久, 高いトルク体積比を持つ小型サーボアクチュエータの開発, 精密工学会誌, Vol.72, No.1, (2006), pp.137-141.
- (56) 松日楽信人, 大明準治, わかりやすいロボットシステム入門, オーム社,(1999), pp.87-92
- (57) 岩附信行, 平面閉ループ機構の順動力学のシステム解析, 日本機械学会第6回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, (2006), pp.83-86.
- (58) 宮川豊美, 岩附信行, 遊星歯車式管径追従車輪走行機構による小口径管内移動ロボットの段差走行, 精密工学会誌, Vol.73, No.7, (2007), pp.828-833.
- (59) 堀光平, 林 巖, 近寄り・遠退きかみあい率均等化による3K型不思議遊星歯車機構減速機の効率改善法, 日本機械学会論文集(C編), Vol.62, No.596, (1996), pp.1548-1553.
- (60) M. Segawa, M. Kimura, K. Ooi and S. Sugi, A Micro Miniaturized CCD Color Camera Utilizing a Newly Development CCD Packaging Technique, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.41, No.3, (1995), pp. 946-953.
- (61) 鈴森康一, 堀光平, 空圧ワブルモータの研究, 日本機械学会論文集(C編), Vol.64, No.622, (1998), pp.2102-2106.
- (62) T. Ito, Y. Hasegawa, K. Ito, and M. Okamura, Ultra-miniature electromagnetic motor, Proc. of third International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS), (1992), pp.27-33.
- (63) 宮川豊美, 鈴森康一, 堀光平, 長谷川幸久, 細径配管移動機構の開発, 1997年度精密工学会秋季大会講演論文集, (1997), pp.470.

付 録

付録 A 直管走行時の車輪走行機構の内力とモーメントの解析結果

直管走行時の遊星歯車式管径追従車輪走行機構の解析に用いた 3.2 節の式(3.16)の内力 F_T ~ $F_{B,y}$ およびモーメント τ_G , τ_B の解析結果は次のようになる。

$$F_T = \frac{r_W}{r_P} L$$

$$F_{W,x} = -L \left[1 + \frac{r_W}{r_P} (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g) \right]$$

$$F_{W,y} = F_{W,x} \tan \lambda$$

$$F_{C,x} = F_{W,x}$$

$$F_{C,y} = F_{W,y}$$

$$F_{G,x} = F_T (S_\lambda - C_\lambda \tan \alpha_g)$$

$$F_{G,y} = -F_T (C_\lambda + S_\lambda \tan \alpha_g)$$

$$F_{B,y} = F_{G,y} + F_{W,y}$$

$$\tau_G = F_T r_G = \frac{r_W r_G}{r_P} L$$

$$\tau_B = \tau_G + b(F_{G,x} + F_{W,x}) + a(F_{G,y} + F_{W,y})$$

付録 B 駆動モータの制御方法

第3章, 第4章, 第5章および7.3節の走行試験に用いた管内移動ロボットの駆動モータの制御ブロック図を図A1に示す. モータ制御は位置と速度の目標値をトルク指令へフィードフォワードさせる制御方法で, 図中の制御パラメータとブロック図のゲインは以下とした.

$\omega_M, \theta_M, \omega_{M,D}, \theta_{M,D}$: モータの速度, 位置およびそれらの目標値

T_I : 速度ループ積分定数

K_{PV} : 速度ループ比例フィードバックゲイン

K_{FV} : 速度ループ比例フィードフォワードゲイン

K_{PP} : 位置ループゲイン

K_{RP} : 位置目標値フィードフォワードゲイン

K_{RV} : 位置目標値フィードバックゲイン

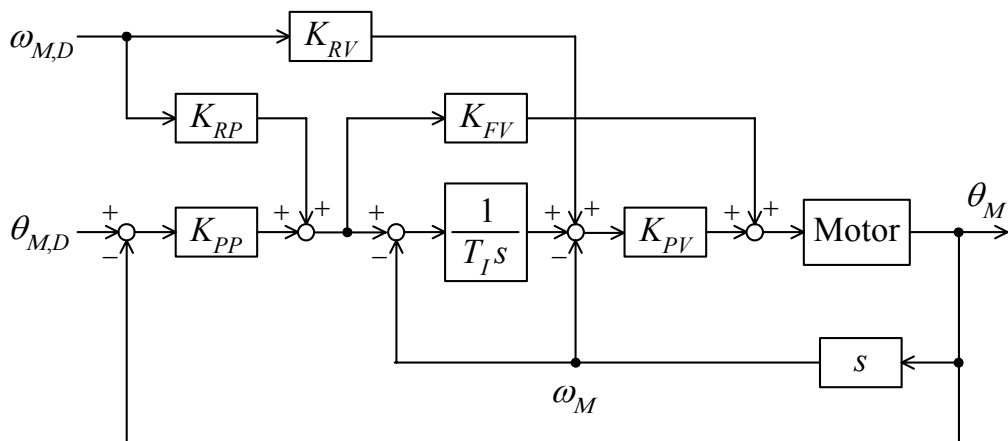


Fig. A1 Motor control block diagram

付録 C 車輪の管壁への押付け力計測用ひずみゲージの校正方法

第3章 3.4.3 項の管内移動ロボットの車輪の管壁への押付け力の計測はひずみゲージを用いて行っている。一般にひずみゲージを用いた計測ではひずみゲージ出力と荷重の関係を校正する必要がある。その校正方法を説明する。

計測に用いたひずみゲージは直交2軸タイプのもので第3章の図 3.14 に示す位置に接着されている。ひずみゲージの校正は実験と同じ荷重条件で行うことが望ましいが、4点集中荷重での校正実験は大きさの制限から困難であり、1点集中荷重で校正実験を行いその結果を用いて車輪の管壁への押付け力を求める。

最初に、有限要素法解析で1点集中荷重が作用する場合と4点集中荷重が作用する場合のひずみゲージが張られている4点での応力を試算した。応力の有限要素法解析に用いた解析モデルを図 A2 に示す。そして、配管の材質をアクリルとしその縦弾性係数は $3.14 \times 10^9 \text{ Pa}$ 、ポアソン比は 0.23 とした。試算した結果、ひずみゲージ SG1 に荷重 P_0 を作用させた1点集中荷重の場合の SG1 と SG3 の応力の総和に対して SG1～SG4 に荷重 P_0 を作用させた4点集中荷重の場合の SG1 と SG3 の応力の総和は 1.7 倍となった。SG1 と SG3 の2点に集中荷重を作用させた場合の総和は 2 倍であった。4点集中荷重の場合の応力は1点集中荷重の場合の単純に 2 倍ではなかった。

次に、1点集中荷重の場合の荷重とひずみゲージ出力との校正係数を求める。応力と荷重の関係から、図 3.14 に示したそれぞれの出力 e_{C1} 、 e_{C2} は次式となる。

$$e_{C1} = K_C P_0 \quad (\text{A1})$$

$$e_{C2} = 2K_C P_0 \times 0.85 \quad (\text{A2})$$

ただし、 K_C はひずみゲージの出力電圧と荷重の校正係数である。 K_C は図 A2 に示す SG1 の位置に荷重を与え、実験より求めた。結果の一例として図 A3 に配管内径 (ID) 48.5mm と 50mm のひずみゲージの荷重と出力電圧の関係を示す。実験より求めた各配管の校正係数は以下となる。4点集中荷重の場合の SG1 と SG3 に作用する荷重の総和は式(A2)より計算でき、図 3.15 に示すひずみゲージの出力 e_1 、 e_2 から管壁に作用する荷重の総和が得られる。

配管内径 48.5mm : $K_C = 0.163 \text{ V/N}$

配管内径 46mm : $K_C = 0.166 \text{ V/N}$

配管内径 50mm : $K_C = 0.069 \text{ V/N}$

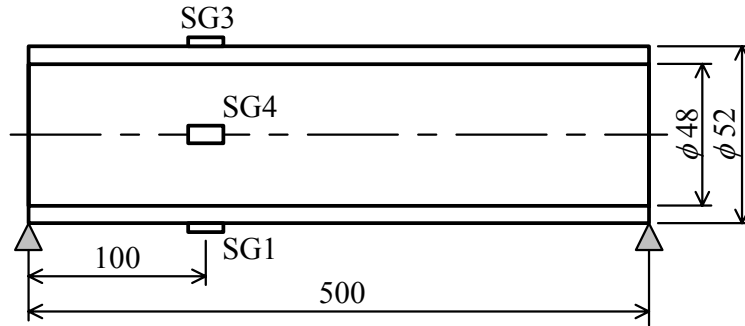


Fig. A2 Stress analysis model of piping

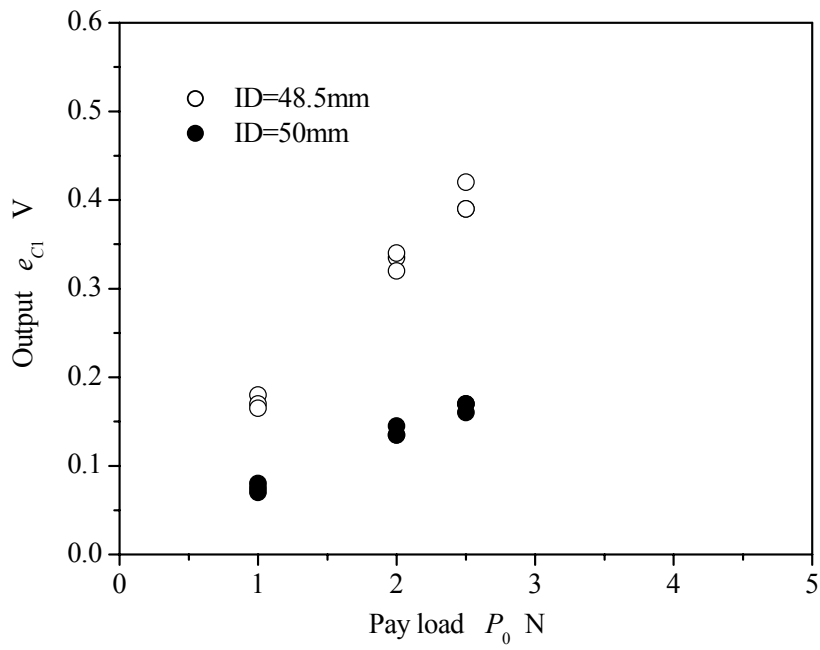


Fig. A3 Calibration factor of the strain gauges

付録 D 車輪を剛体とした段差通過時の力学解析に用いた各係数

5.2 節の車輪を剛体とした段差通過時の力学解析に用いた式(5.24)の各係数 $A_{11} \sim A_{40}$ は以下とした.

$$A_{11} = -\frac{r_w \cos \alpha}{l C_\lambda}, \quad A_{12} = \frac{r_w}{l} \frac{\dot{\alpha}}{C_\lambda^2} (-\dot{\lambda} S_\lambda \cos \alpha + \dot{\alpha} C_\lambda \sin \alpha),$$

$$A_{13} = -r_w \sin \alpha, \quad A_{14} = -r_w \dot{\alpha}^2 \cos \alpha, \quad A_{15} = r_w \cos \alpha,$$

$$A_{16} = -r_w \dot{\alpha}^2 \sin \alpha, \quad A_{21} = -l S_\lambda, \quad A_{22} = -l \dot{\lambda}^2 C_\lambda,$$

$$A_{23} = l C_\lambda, \quad A_{24} = -l \dot{\lambda}^2 S_\lambda, \quad A_{31} = A_{13} + A_{21} A_{11},$$

$$A_{32} = A_{31} A_{12} + A_{14} + A_{22}, \quad A_{33} = A_{15} + A_{13} A_{21}$$

$$A_{34} = A_{23} A_{12} + A_{26} + A_{24}, \quad A_{35} = [(1 + u_p) A_{11} - 1] / u_p,$$

$$A_{36} = (1 + u_p) A_{12} / u_p, \quad A_{37} = (A_{13} + A_{31}) / 2,$$

$$A_{38} = (A_{14} + A_{32}) / 2, \quad A_{39} = (A_{15} + A_{33}) / 2,$$

$$A_{40} = (A_{16} + A_{34}) / 2$$

付録 E 車輪を弾性体とした段差通過時の力学解析に用いた各係数

5.3 節の車輪の弾性変形を考慮した段差通過時の力学解析に用いた式(5.43)の各係数 $B_{11} \sim B_{55}$ は以下とした.

$$B_{11} = -r_W \sin \alpha, \quad B_{12} = B_{15} = 1, \quad B_{13} = -r_W \dot{\alpha}^2 \cos \alpha,$$

$$B_{14} = r_W \cos \alpha, \quad B_{16} = -r_W \dot{\alpha}^2 \sin \alpha, \quad B_{21} = -B_{14}/lC_\lambda,$$

$$B_{22} = -B_{15}/lC_\lambda, \quad B_{23} = -(B_{16}C_\lambda + \dot{y}_W \dot{\lambda} S_\lambda)/lC_\lambda^2$$

$$B_{31} = -lS_\lambda, \quad B_{32} = -l\dot{\lambda}^2 C_\lambda, \quad B_{33} = lC_\lambda,$$

$$B_{34} = -l\dot{\lambda}^2 S_\lambda, \quad B_{41} = B_{11} + B_{31}B_{21}, \quad B_{42} = B_{31}B_{22},$$

$$B_{43} = B_{13} + B_{31}B_{23} + B_{32}, \quad B_{44} = B_{14} + B_{33}B_{21}$$

$$B_{45} = B_{15} + B_{33}B_{22}, \quad B_{46} = B_{16} + B_{33}B_{23} + B_{34},$$

$$B_{47} = [(1 + u_P)B_{21} - 1]/u_P, \quad B_{48} = (1 + u_P)B_{22}/u_P,$$

$$B_{49} = (1 + u_P)B_{23}/u_P, \quad B_{50} = (B_{11} + B_{41})/2,$$

$$B_{51} = B_{42}/2, \quad B_{52} = (B_{13} + B_{43})/2,$$

$$B_{53} = (B_{14} + B_{44})/2, \quad B_{54} = (B_{15} + B_{45})/2,$$

$$B_{55} = (B_{16} + B_{46})/2$$

論文リスト

A 投稿論文

- (1) T. Miyagawa, K. Hori, Y. Hasegawa, K. Suzumori and H. Sudo, Micro SCARA Robot for Miniature Parts Assembling, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.9, No.5, (1997), pp.341-347.
- (2) 宮川豊美, 鈴森康一, 木村正信, 長谷川幸久, 1インチ用配管作業ロボットの開発, *日本ロボット学会誌*, Vol.17, No.3, (1999), pp.389-295.
- (3) K. Suzumori, T. Miyagawa, M. Kimura and Y. Hasegawa, Micro Inspection Robot for 1-in Pipes, *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Vol.4, No.3, (1999), pp.286-292.
- (4) 宮川豊美, 神野誠, 中山忠弘, 長谷川幸久, 高いトルク体積比を持つ小型サーボアクチュエータの開発, *精密工学会誌*, Vol.72, No.1, (2006), pp.137-141.
- (5) 宮川豊美, 岩附信行, 遊星歯車式車輪走行機構による小口径管内移動ロボットの走行特性, *精密工学会誌*, Vol.72, No.12, (2006), pp.1547-1552.
- (6) 宮川豊美, 岩附信行, 遊星歯車式管径追従車輪走行機構による小口径管内移動ロボットの段差走行, *精密工学会誌*, Vol.73, No.7, (2007), pp.828-833.

B 国際会議講演論文

- (1) K. Suzumori, K. Hori, and T. Miyagawa, “A direct-drive pneumatic stepping motor for robots: Designs for pipe-inspection microrobots and for human-care robots,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA1998)*, (1998), pp. 3047–3052.
- (2) T. Miyagawa, K. Suzumori, M. Kimura and Y. Hasegawa, Development of Micro-Inspection Robot for Small Piping, *Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms (IFTToMM1999)*, (1999), pp.856-861.
- (3) T. Miyagawa, N. Iwatsuki, Characteristics of In-pipe Mobile Robot with Wheel Drive Mechanism using Planetary Gears, *Proc. of IEEE Int. conf. on Mechatronics and Automation (ICMA2007)*, (2007), pp 3646-3651.

C 解説

- (1) T. Miyagawa, K. Suzumori, M. Kimura and Y. Hasegawa, Development of Micro-Inspection Robot for Small Piping, *Int. J. Japan Society of Precision Engineering*, Vol.33, No.2, (1999), 90-93.
- (2) 宮川豊美, 堀光平, 伊藤賢一, 超小型減速機・エンコーダを内蔵したサーボアクチュエータの開発, *精密工学会誌*, Vol.63, No.8, (1997), pp.1073-1078.

D 国内学会口頭発表

- (1) 宮川豊美, 須藤肇, 堀光平, 村田義春, 伊東哲也, 超小形サーボモータの試作, 1994年度精密工学会春季大会講演論文集,(1994),pp.663-664.
- (2) 宮川豊美, 堀光平, 須藤肇, 長谷川幸久, 伊藤賢一, 伊東哲也, マイクロサーボアクチュエータの性能評価, 1996年度精密工学会春季大会講演論文集,(1996), pp.1037-1038.
- (3) 宮川豊美, 堀光平, 長谷川幸久, マイクロサーボアクチュエータを利用した超小型ロボットの開発, 1997年度精密工学会春季大会講演論文集,(1997),pp.1183-1184.
- (4) 宮川豊美, 鈴森康一, 木村正信, 長谷川幸久, 小口径配管作業ロボットの開発, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集,(1997),pp.255-256.
- (5) 宮川豊美, 鈴森康一, 堀光平, 長谷川幸久, 細径配管移動機構の開発, 1997年度精密工学会秋季大会講演論文集,(1997),pp.470.
- (6) 長谷川幸久, 伊藤賢一, 伊東哲也, 宮川豊美, 超小形モータを用いた車輪式ワイヤ走行装置の試作, 1998年度精密工学会春季大会講演論文集,(1998),pp.559.
- (7) 宮川豊美, 長谷川幸久, 堀光平, 減速機を内蔵したマイクロアクチュエータの諸特性, 1998年度精密工学会秋季大会講演論文集,(1998),pp.573.
- (8) 柳原敏, 伊藤博邦, 畠山睦夫, 宮川豊美, 鈴森康一, 配管内部汚染分布測定ロボットの開発(第1報, システム構成と管内移動機構の開発), 第18回日本ロボット学会学術講演会,(2000),pp.141-142.
- (9) 柳原敏, 伊藤博邦, 畠山睦夫, 宮川豊美, 鈴森康一, 配管内部汚染分布測定ロボットの開発(第2報, 管内移動と管内面の汚染分布測定の実施), 第18回日本ロボット学会学術講演会,(2000),pp.143-144.
- (10) 宮川豊美, 神野誠, 伊藤賢一, 長谷川幸久, 小型減速機を内蔵した高トルクモータの開発, 2003年度精密工学会春季大会講演論文集,(2003),pp.557.
- (11) 宮川豊美, 神野誠, 伊藤賢一, 長谷川幸久, 小型遊星歯車減速機を内蔵した高トルクアクチュエータの開発, 第3回機素潤滑設計部門講演会講演論文集,(2003), pp.153-154.
- (12) 宮川豊美, 1cm径の小型減速機を搭載した高トルクアクチュエータ, 日本機械学会2003年度年次大会講演会資料,(2003),pp.185-186.
- (13) 宮川豊美, 神野誠, 伊藤賢一, 長谷川幸久, 減速機内蔵型高トルクアクチュエータの開発, 2003年度精密工学会秋季大会講演論文集,(2003),pp.577.
- (14) 宮川豊美, 神野誠, 中山忠弘, 長谷川幸久, 遊星歯車減速機を内蔵した小型サーボアクチュエータの開発, 第4回機素潤滑設計部門講演会講演論文集,(2004),pp.155-158.
- (15) 宮川豊美, 神野誠, 中山忠弘, 長谷川幸久, 小型遊星歯車減速機の効率改善, 2004年度精密工学会秋季大会講演論文集,(2004),pp.905-906.
- (16) 宮川豊美, 岩附信行, 遊星歯車式管径追従車輪走行機構による小口径管内移動ロボット～段差通過時の力学解析～, 第13回日本I F T o M M会議シンポジウム前刷集,(2007),pp.65-72.

謝 辞

本研究の遂行およびまとめにあたり終始懇切なるご指導をいただいた東京工業大学大学院理工学研究科教授 岩附信行 氏には謹んで深謝の意を表します。また、本論文をまとめるに際し有益なご教示およびご助言をいただいた東京工業大学大学院理工学研究科教授 広瀬茂男 氏，同教授 杉本浩一 氏，同大学院総合理工学研究科教授 北條春夫 氏，同大学院理工学研究科准教授 武田行生 氏には心より感謝の意を表します。

研究を遂行するにあたりご指導，ご支援いただいた株式会社東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー首席技監 久保田裕二 氏，同研究開発センター 東芝欧州研究所ケンブリッジ研究所副所長 佐田豊 氏，同研究開発センター 機械・システムラボラトリー室長 向井稔 氏，元同研究主幹 塩山勉 氏，同研究主幹 服部俊介 氏，同主任研究員 秋葉敏克 氏には心から感謝の意を表します。

研究にあたり直接，ご指導，ご支援いただいた元株式会社東芝 社会インフラシステム社主幹 飯倉省一 氏，元株式会社東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主幹 辰野恭市 氏，元機械・システムラボラトリー主任研究員 須藤肇 氏，株式会社東芝 研究開発センター ヒューマンセントリックラボラトリー技監 松日楽信人 氏，同機械・システムラボラトリー主任研究員 神野誠 氏，同主任研究員 額田秀記 氏には心から感謝致します。

研究開発にあたっては，元株式会社東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務で現在岡山大学工学部システム工学科教授 鈴森康一 氏には，機械・システムラボラトリー在職中に本研究をはじめとする研究活動全般に関する指導・教育をいただき，その後も終始暖かいご支援・ご助言をいただくとともに，本研究の「遊星歯車式管径追従車輪走行機構」の提案者であり，1インチ管および3インチ管の管内移動作業ロボットの技術開発に関して随時的確な指導をいただき，心から感謝致します。

小型サーボアクチュエータの研究開発に際しては，株式会社東芝 生産技術センター モータ技術開発センター主任研究員 長谷川幸久 氏，同研究主務 伊東哲也 氏，同研究主務 中山忠弘 氏，同研究主務 伊藤賢一 氏，元株式会社東芝 研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主務 堀光平 氏のご協力ご支援に深く感謝致します。

1インチ管用検査回収ロボットの研究開発に際しては，元株式会社東芝 デジタルメディアネットワーク社主査 木村正信 氏，元東芝A V E株式会社 第二事業部情報システム技術部 杉修一 氏ならびに小口径配管作業ロボット開発チームメンバー各位のご協力ご支援に深く感謝致します。

3インチの配管内部放射能汚染測定ロボットの研究開発に際しては，株式会社東芝 電力システム社 磯子エンジニアリングセンター 原子力機器設計部主査 湯口康弘 氏，同主務 高木薫 氏，また日本原子力研究所 東海研究所 バックエンド技術部技術開発室の皆様のご協力ご支援に感謝致します。

2インチ管用管内移動ロボットの走行試験に際しては，研究開発センター 事業開発室研

究主務 砂押貴光 氏のご協力ご支援に感謝致します。

研究開発全般で用いた実験装置の設計製作に際しては研究開発センター 機器試作部の皆様のご協力ご支援に感謝致します。また、機械・システムラボラトリー 先端アクチュエータ研究プログラムのメンバー各位のご協力ご支援に感謝致します。

最後に、学会にて有益な議論、助言をいただいた多くの方々に感謝致します。とくに管内作業ロボットの小型化技術についての議論と励ましをいただいた東京工業大学名誉教授 林 輝 氏、香川大学知能機械システム工学科教授 大平文和 氏、東京工業大学大学院総合理工学研究科教授 堀江三喜男 氏には深く感謝致します。そして、家族（悦子，知美，侑亮，明香）の理解と支援に感謝致します。

2008年2月